



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA**

**EVALUACIÓN DE UN COCEDOR SOLAR DOMÉSTICO**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**JUAN CARLOS CASTRO DOMÍNGUEZ**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. JESÚS ANTONIO DEL RÍO PORTILLA**  
**INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES**

**MÉXICO, D. F. AGOSTO 2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** Dr. Sergio Cuevas García  
**Secretario:** Dr. Jesús Antonio del Río Portilla  
**Vocal:** Dr. Federico Vázquez Hurtado  
**1 er. Suplente:** Dr. Oscar Alfredo Jaramillo  
**2 d o. Suplente:** Dr. Saúl Tapia Salinas

Lugar donde se realizó la tesis:

**INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES**

TUTOR DE TESIS:

**Dr. Jesús Antonio del Río Portilla**

-----  
FIRMA



# Agradecimientos

Al Dr. Jesús Antonio del Río Portilla, por su dirección y paciencia en la realización de este proyecto.

Al Dr. Saúl Tapia Salinas, al Dr. Sergio Cuevas García, al Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado y al Dr. Federico Vázquez Hurtado, por sus comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo.

A la Ing. Claudia Érika Nava Ayala y a la I. Q. Miriam Carreño, por su apoyo en la etapa experimental de este trabajo.

Al Ing. Jesús Quiñones Aguilar, por su apoyo en la obtención de datos con la estación meteorológica y solarimétrica del IER

Al Instituto de Energías Renovables de la UNAM, por aceptarme como estudiante de maestría.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada para realizar la maestría.





# Dedicatoria

Al lector.



# Índice general

Índice general.....	X
Índice de figuras.....	XI
Índice de tablas.....	XIII
Resumen .....	XV
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivos .....	6
2. Diseño del cocedor solar .....	9
2.1 Base metálica.....	10
2.2 Olla de presión .....	11
2.3 Cúpula transparente .....	12
2.4 Carcasa de aluminio .....	15
2.5 Sistema de respaldo eléctrico .....	16
2.6 Sistema de concentración solar .....	18
3. Modelo termodinámico del cocedor solar.....	23
3.1 Energía acumulada .....	24
3.2 Energía que entra .....	24
3.2.1 Energía solar incidente.....	25
3.2.2 Energía solar reflejada .....	25
3.3 Energía que se transfiere al ambiente .....	33
3.4 Solución de ecuación de balance .....	37
4. Desarrollo experimental .....	45
4.1 Objetivos de la evaluación experimental .....	45
4.2 Diseño de las pruebas experimentales.....	46
4.3 Instrumentación para la etapa experimental .....	48
5. Resultados y discusión .....	53

6. Conclusiones.....	76
Referencias .....	81



# Índice de figuras

Figura 1.1: Cocedor solar doméstico. ....	5
Figura 2.1: Esquema del cocedor solar. ....	10
Figura 2.2: Base metálica del cocedor solar. ....	11
Figura 2.3: Olla de presión de capacidad de 5 L. ....	12
Figura 2.4: Cúpula del cocedor solar. ....	13
Figura 2.5: Fotografía de la configuración de la determinación de $\tau_{plástico}$ . ....	13
Figura 2.6: Carcasa del cocedor solar. ....	15
Figura 2.7: Diagrama de flujo de la programación del cocedor solar. ....	17
Figura 2.8: Sistema de concentración solar del cocedor. ....	19
Figura 3.1: Funcionamiento del espejo a las 12 horas solar. ....	29
Figura 3.2: Imagen proyectada y área interceptada. ....	31
Figura 3.3: Evolución de la eficiencia de la energía solar reflejada a lo largo del día. ....	33
Figura 3.4: Disposición de la resistencias térmicas para el transporte de energía por conducción y convección. ....	36
Figura 3.5: Disposición de las resistencias térmicas para el flujo de energía por radiación. ....	37
Figura 4.1: Comparación de las diferentes condiciones bajo las que se pueden habilitar los sensores. ....	51
Figura 5.1: Evolución de la temperatura en los cocedores uno y dos el día 4 de marzo de 2013. ....	54
Figura 5.2: Energía y eficiencias durante el proceso de cocción del día 4 de marzo de 2013. ....	55
Figura 5.3: Potencia de cocción y eficiencia del cocedor para el 4 de marzo de 2013. ....	56

Figura 5.4: Regresión lineal de la potencia de cocción contra la diferencia de temperaturas entre el cocedor y el medio ambiente del 4 de marzo de 2013. ....	57
Figura 5.5: Evolución de la temperatura durante la prueba del día 15 de abril de 2013. ....	59
Figura 5.6: Energía útil y eficiencia de los cocedores en la prueba del día 15 de abril de 2013. ....	61
Figura 5.7: Potencias de cocción y eficiencias para los cocedores de la prueba del día 15 de abril de 2013. ....	62
Figura 5.8: Regresión lineal para las potencias de cocción de los cocedores en la prueba del 15 de abril de 2013. ....	63
Figura 5.9: Regresión lineal para la determinación del coeficiente de enfriamiento de los cocedores de la prueba del 15 de abril de 2013. ....	64
Figura 5.10: Disposición de los sensores bajo la base metálica en la prueba del 3 de abril de 2013. ....	68
Figura 5.11: Comportamiento del cocedor solar con respaldo eléctrico para el día 3 de abril de 2013. ....	69
Figura 5.12: Resultados obtenidos en la prueba del día 5 de abril de 2013. ....	70
Figura 5.13: Resultados obtenidos en la prueba del 9 de abril de 2013. ....	71

# Índice de tablas

Tabla 2.1: Determinación de la transmitancia del plástico con el que se hizo la cúpula, $\tau_{plástico}$ . .....	14
Tabla 2.2: Propiedades térmicas, ópticas y medidas del cocedor solar.....	21
Tabla 3.1: Área interceptada para diferentes valores de $\psi$ . .....	32
Tabla 5.1: Parámetros de las diferentes configuraciones probadas el 4 de marzo y el 15 de abril de 2013 .....	65





# Resumen

En este trabajo se presenta la evaluación teórica y experimental de una nueva propuesta de cocedor solar doméstico, en la que la principal innovación consiste en extender el área de captación con una pieza metálica plana circular.

El cocedor solar es un dispositivo capaz de elevar la temperatura de los alimentos por encima de 90 °C durante 2 horas, para tal fin utiliza energía solar y, cuando esta no es suficiente, se auxilia de otra fuente de energía.

El cocedor evaluado en este trabajo de tesis se compone de una base metálica, una olla de presión, una cúpula transparente de plástico que soporta altas temperaturas, una carcasa de aluminio, un sistema de concentración solar y un sistema de respaldo eléctrico.

Para hacer la evaluación teórica se desarrolló un modelo termodinámico que describe la evolución de la temperatura de los alimentos a partir de las propiedades termofísicas de los materiales con que está construido, la dimensiones del dispositivo, su geoposición, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación solar global y la directa.

Se construyeron 2 cocedores solares en los que se hicieron diferentes pruebas, con estas se obtuvieron los datos necesarios para realizar la evaluación experimental. Las pruebas se llevaron a cabo en la plataforma solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

Con las evaluaciones se determinó la discrepancia del modelo con los datos experimentales. Para el cocedor sin el sistema de concentración presenta una discrepancia máxima de 8.3 % y una promedio de 4.36 %. Por otro lado, cuando se cuenta con este sistema la diferencia máxima es de 9.30 % y la promedio de 6.08 %.

En cuanto al efecto de la base metálica y el sistema de concentración, se tienen que cuando el cocedor cuenta con ambos su potencia de cocción máxima es de  $103 \pm 5$  W, su temperatura máxima  $115.4 \pm 0.1$  °C, su potencia de cocción para una diferencia de temperatura entre el cocedor y el ambiente de 50 °C es de  $43 \pm 7$  W y su coeficiente de enfriamiento  $1.3 \pm 0.2$  W/K. Para el caso en el que el cocedor se usa como una estufa solar abierta, es decir, con sistema de concentración

y sin la base metálica estos valores son de  $73\pm 4$  W,  $90.4\pm 0.2$  °C,  $10\pm 10$  W y  $1.1\pm 0.2$  W/K, respectivamente. Por otro lado cuando al cocedor solar se le retira el sistema de concentración los valores obtenidos son de  $80\pm 4$  W,  $89.7\pm 0.2$  °C y  $20\pm 10$  W, respectivamente.

Al final, basados en el análisis hecho a los datos teóricos y experimentales, se concluyó que la innovación hecha al cocedor solar si representa una mejora para el funcionamiento del mismo. Incrementar el área de captación del cocedor hace que alcance temperaturas y potencias de cocción más altas, así como un mejor desempeño.





# 1.Introducción

En este trabajo se presenta la evaluación teórica y experimental de una nueva propuesta de cocedor solar. Primero se presenta una revisión de los antecedentes de estas tecnologías, hasta llegar al dispositivo que será objeto de investigación de esta tesis, para luego establecer los objetivos de la misma.

## 1.1 Antecedentes

La cocción de los alimentos surgió a partir del descubrimiento del fuego, las ventajas de hacerlo van desde mejorar el sabor y textura de la comida, hasta eliminar bacterias y alentar la velocidad con que descompone, especialmente las carnes. Hoy en día cocinar alimentos es una necesidad cotidiana para el humano, algunos autores la clasifican incluso como la más importante [13]. Es por esto que es primordial atender el requerimiento energético que esta actividad representa.

En la actualidad casi un tercio de la población mundial cocina su comida con leña [1]. En el caso de México, son entre 25 y 28 millones las personas que recurren a esta práctica, es decir, cerca de un quinto de los mexicanos preparan sus alimentos con leña [14]. El resto de la población lo hace con la quema de gas LP y gas natural. También se usa energía eléctrica para la cocción de alimentos pero, además de ser muy poco común, en algunas ocasiones esta proviene de la quema de combustibles fósiles o de las fuentes ya mencionadas.

El uso de estas fuentes de energía genera problemas importantes de carácter social, económico y ambiental por el hecho de que ser no renovables o difícilmente renovables, en el caso de la biomasa. Aunado a esto, surge un problema propio del uso de estas fuentes energéticas en el hogar, los gases que generan, además de ser contaminantes, son nocivos para la salud. Se estima que cerca de 2 millones de personas, principalmente mujeres y niños, mueren cada año de manera prematura por enfermedades respiratorias causadas por dichos gases.

Es por esta problemática que existe la necesidad crítica de buscar alternativas accesibles, seguras y eficientes para la cocción de alimentos.

Una solución a estos problemas es el uso de energía solar como fuente alterna de energía para la preparación de alimentos. Su uso tiene varias ventajas que van desde su abundancia en las zonas con mayor densidad de población en el planeta [13], hasta la nula emisión de gases tóxicos o contaminantes. Además es una energía renovable, inagotable en escala humana.

El uso de energía solar para la preparación de alimentos no es algo nuevo, se sabe que desde el segundo siglo A.C. los judíos esenios la usaban para calentar obleas, o que en Europa en el año 1200 era común deshidratar alimentos exponiéndolos al Sol [12]. El desarrollo de tecnologías propiamente para la cocción de alimentos se remonta al siglo XVIII, en 1767 el suizo Horace de Saussure registró la primer patente de horno solar con el alcanzó temperaturas de 88 °C y coció fruta[12]. A partir de ese momento y hasta la actualidad, se han inventado varios dispositivos para cocer alimentos, los cuales, a pesar de las diferencias que existen entre ellos, funcionan bajo el mismo principio, absorber radiación solar para calentar una olla que contiene los alimentos.

Las cocinas solares se dividen en dos importantes grupos: las que calientan los recipientes con la comida de manera directa y las que lo hacen de manera indirecta.

En las cocinas que lo hacen de manera directa, se colocan la olla en el colector solar, que es el componente con el que se capta la radiación emitida por el Sol; en algunos casos incluso la olla es el propio captador.

Las cocinas que lo hacen de manera indirecta, colocan la olla fuera de dicho colector y luego usan un fluido caloportador para transportar la energía. Este colector puede ser plano, de tubos evacuados o de concentración.

Los dispositivos que calientan los recipientes con comida de manera directa se clasifican en dos categorías principales: los de tipo caja y los abiertos; se conocen también como hornos solares tipo caja y estufas solares, respectivamente.

Los hornos solares tipo caja, se componen de un recinto aislado térmicamente por todos los lados, con una cubierta transparente en la parte superior que permite que entre la radiación solar, de esta manera se produce en un efecto invernadero

que eleva la temperatura de su interior y permite que grandes cantidades de comida puedan cocerse en él. Este recinto o caja puede ser de diferentes geometrías.

Los hornos solares tipo caja pueden contar o no con paneles reflejantes que capten radiación solar extra y la dirijan a la cubierta transparente para su aprovechamiento. Los paneles pueden ser móviles o fijos.

Las estufas solares cuentan con reflectores que dirigen la radiación solar hacia una cierta área en la que se coloca la olla que contiene los alimentos. En algunos casos, la olla se cubre con una bolsa transparente de plástico o con un domo de vidrio para disminuir las pérdidas de energía.

Depende del sistema de reflectores, al que se le puede considerar un sistema de concentración, si la radiación solar se concentra por arriba o por abajo de la olla.

El sistema de concentración de las estufas solares debe ser móvil, ya sea para orientarlo a lo largo del día o de las estaciones.

Al igual que todas las tecnologías solares, la baja densidad energética y la intermitencia de la energía son los principales problemas que presenta la utilización de cocinas solares. Para resolver el primero, se utilizan espejos con los que se concentra la energía; mientras que para el segundo, un sistema auxiliar o de respaldo que suministre energía de otra fuente.

Es en ese momento, cuando el dispositivo cuenta con un sistema auxiliar, que se le llama cocedor solar. Por lo general, el sistema auxiliar se compone de una resistencia eléctrica y un control electrónico equipado con un sensor de temperatura, que determina cuando la radiación solar no es suficiente para la cocción y se requiere de una fuente alterna. Así pues, el cocedor solar es un dispositivo que aprovecha la mayor cantidad de energía disponible y, en caso de no ser suficiente, usa energía eléctrica para llevar a buen término la cocción de los alimentos.

Con base en lo reportado en la literatura [5] y [12], se establece como cocción de los alimentos a mantener la temperatura de los mismos por encima de 90 °C durante 2 horas.



El uso de cocinas solares conlleva varias ventajas, las más obvias son las que se tienen al usar una fuente de energía limpia y renovable como el Sol, y que de hecho ya fueron mencionadas con anterioridad. Sin embargo, hay algunas otras no tan evidentes que se han descubierto al observar la manera a la que cuecen estas tecnologías. Estas ventajas son: la cocción es lenta, lo hace que las grasas de los alimentos se separen, haciendo más fácil su extracción para lograr comidas más sanas, las carnes que se cuecen lentamente terminan con texturas más blandas y jugosas, una vez que la comida se pone a cocer, en algunos cocedores, la intervención del humano es mínima; a esto hay que agregar que los cocedores solares no alcanzan temperaturas demasiado altas lo que en principio debería conservar mejor los nutrientes de los alimentos.

Esto último, el qué tan bien se conservan los nutrientes en la comida solar, representa otro tema importante de investigación que en la actualidad se encuentra bajo estudio en el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM. Se están analizando los nutrientes de los alimentos cocidos con esta tecnología para su posterior comparación con los preparados de manera convencional.

Aunque en la actualidad existen cocinas que cumplen con la función de preparar los alimentos con energía solar, siguen teniendo desventajas que limitan su uso y evitan que se perciban como una alternativa viable para la preparación de comida. Entre las desventajas de estos dispositivos están: la dependencia total de las condiciones climatológicas, el tiempo de cocción es largo si se compara con el modo convencional de preparar alimentos, además que las horas de operación suelen no coincidir con las de comida, en algunos casos, requiere de orientación continua que no siempre es sencilla, se tiene que cocinar en el exterior, algunos son complicados de operar y pueden llegar a ser costosos.

En este trabajo de tesis se presenta la evaluación teórica y experimental de una alternativa de un cocedor solar que busca atacar algunas de estas desventajas, este se muestra en la Figura 1.1. Es un cocedor fácil de construir, de operar y de dar mantenimiento, está hecho con materiales comunes que son igualmente fáciles de remplazar en caso de ser necesario, además cuenta con un sistema de control en el que la temperatura y tiempo de cocción son programables.



Figura 1.1: Cocedor solar doméstico.

El cocedor solar está compuesto por una base metálica circular, una olla de presión con los mangos recortados, una cúpula transparente de plástico para altas temperaturas, una carcasa de aluminio, un sistema de control electrónico y un sistema de concentración solar compuesto por dos espejos planos.

La innovación que presenta este cocedor, es que se extiende el área de captación del dispositivo con el uso de la base metálica, al estar pintada de negro absorbe energía solar que luego transmite por conducción a la olla que contiene los alimentos.

Este cocedor está pensado para preparar 4 litros de comida, su funcionamiento consiste en introducir los alimentos por la mañana, darle un tiempo de precalentamiento solo con energías solar por 2 horas y finalmente, darle dos horas de cocción, en las cuales de no ser suficiente con la radiación solar, se recurrirá a energía eléctrica para lograrlo. Es decir, a lo largo de las 4 horas que dura su operación no requiere mayor participación humana más que para introducir y extraer los alimentos, además que la cocción de los mismos está asegurada.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es evaluar teórica y experimentalmente una nueva propuesta de cocedor solar doméstico.

Para cumplir el objetivo principal hay varios objetivos particulares:

Desarrollar un modelo termodinámico que describa la evolución de la temperatura del cocedor solar durante el proceso de cocción.

Junto con el modelo, se debe establecer la manera de calcular los números característicos del cocedor solar. Por tratarse de una tecnología nueva, las pruebas que existen para otros cocedores no se pueden aplicar de manera directa a este dispositivo.

Construir el prototipo para realizar las pruebas experimentales necesarias.

Instrumentar el equipo para la medición de temperatura durante las corridas experimentales.

Poner en operación el aparato para obtener datos experimentales, además de observar el funcionamiento de los diferentes sistemas que lo componen.

Analizar los datos obtenidos experimentalmente, calcular con estos los números característicos del cocedor y compararlos con lo predicho por el modelo propuesto.

La organización de este trabajo se detalla a continuación:

En el capítulo 1 se hace una revisión los antecedentes y conceptos importantes sobre cocedores solares, se establece la motivación del trabajo, la problemática que se busca resolver y finalmente, se establecen los objetivos del mismo.

En el capítulo 2 se describe de manera detallada cada uno de los componentes del cocedor solar, se explica la función de cada uno y se presentan sus propiedades termofísicas, además se muestran dibujos técnicos con sus especificaciones. Al final del capítulo se concentran todos los datos importantes en una tabla.

En el capítulo 3 se presenta el modelo termodinámico que se está proponiendo, así como las ecuaciones con las cuales se calculan los números característicos del cocedor solar. Al final del capítulo se presenta el método de solución del modelo.

En el capítulo 4 se exponen los objetivos de la etapa experimental, se detallan los preparativos para las pruebas experimentales, tales como la instrumentación y la planeación de las mismas.

En el capítulo 5 se presentan los resultados, tanto los obtenidos de manera teórica con el modelo propuesto, como los obtenidos con las corridas experimentales, conforme se van presentando resultados se realiza un análisis y discusión de los mismos.

En el capítulo 6 se puntualizan las principales conclusiones de la tesis, así como recomendaciones para trabajos futuros.

Ahora que se han establecido los objetivos y el porqué de ellos, se procede a describir detalladamente cada uno de los componentes del cocedor en el siguiente capítulo.



## 2. Diseño del cocedor solar

En este capítulo se presenta el diseño de un cocedor solar doméstico, se describe el dispositivo de manera general, se detalla cada uno de sus componentes y se explica la función de cada uno de ellos. Además se presentan las propiedades termofísicas de los materiales con que está construido y las dimensiones de sus componentes. Al final del capítulo se presenta un resumen de todos estos datos en la Tabla 2.2.

Para explicar su funcionamiento de manera general se recurre a la Figura 2.1 en la se muestra un esquema del cocedor solar. En esta figura se puede observar como la base metálica está en contacto con la base de la olla, de esta manera la energía captada por la base se transmitirá por conducción de calor hasta el interior de la olla, hay que tener presente que a lo largo de la cocción el contenido de la olla, los alimentos, representan el punto frio del cocedor solar, por lo que la energía debe fluir en forma de calor hasta dicho punto.

La base metálica y la olla están pintadas de color negro mate para aumentar la captación de energía. La base esta soportada con tres tornillos para evitar lo más posible el contacto con cualquier componente del cocedor que no sea la olla de esta manera evita malgastar energía en efectos ajenos a la cocción del los alimentos.

En la Figura 2.1 también se puede observar como la cúpula encaja en las canaletas de la carcasa, para mantener una cantidad de aire confinado y que no haya intercambia con el exterior, de esta manera se evitan perdidas de energía por intercambio de masa.

Si bien sigue habiendo pérdida de energía en forma de calor por los tres diferentes mecanismos, la presencia de la cúpula representa resistencias para a dicho flujo de energía. Si se observa la pérdida por conducción se tienen que la masa de aire encapsulada estática representa un aislante, por el lado de la convección este aire se calienta de manera tan lenta junto al cocedor solar que se puede despreciar y finalmente por radiación el plástico de la cúpula presenta las propiedades necesarias para que el efecto invernadero ocurra, permitiendo el paso

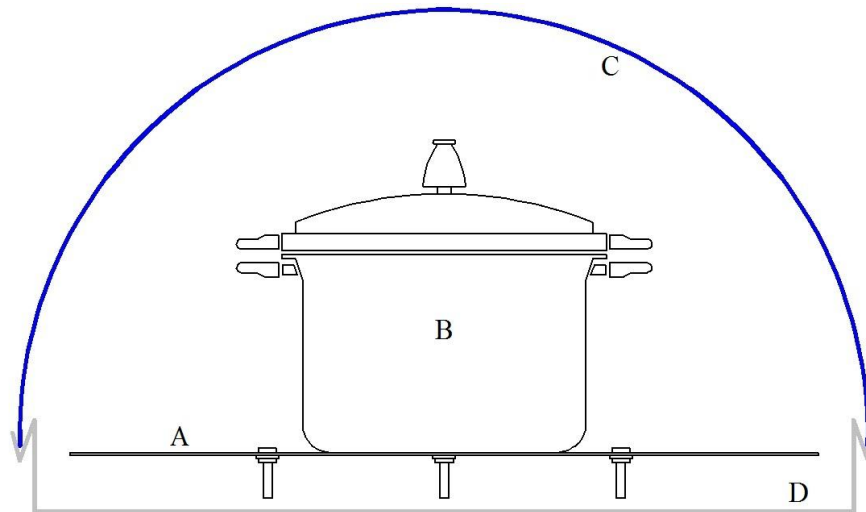


Figura 2.1: Esquema del cocedor solar. A) Base metálica B) Olla de presión  
C) Cúpula transparente D) Carcasa.

de la radiación solar al interior del cocedor e impidiendo la emisión de energía por radiación infrarroja al exterior.

Los componentes principales del cocedor solar son: una base metálica, una olla de presión, una cúpula transparente, una carcasa de aluminio, un sistema de concentración solar y un sistema de respaldo eléctrico. En las siguientes secciones se presentara cada componente de manera detallada.

## 2.1 Base metálica

El cocedor solar tiene como principal innovación una base metálica que aumenta el área de captación del equipo, es de aluminio y está pintada de color negro mate. Se usó una pintura comercial para altas temperaturas que tiene una absorbanca de 0.85. El color de la pintura es muy importante ya que da la ventaja de tener una absorbanca más alta que si fuera de un color claro.

La base metálica, tiene un radio de  $0.265 \pm 0.001$  m y un el grosor de una lámina calibre 12, de  $2.053 \times 10^{-3}$  m. Para soportarla se le colocan tres tornillos de 1/4'' por 2 1/2'' a 0.125 m del centro, que es lo mínimo que permite el radio de la base de la olla. Esta distancia debe ser lo más pequeña posible para evitar perder la

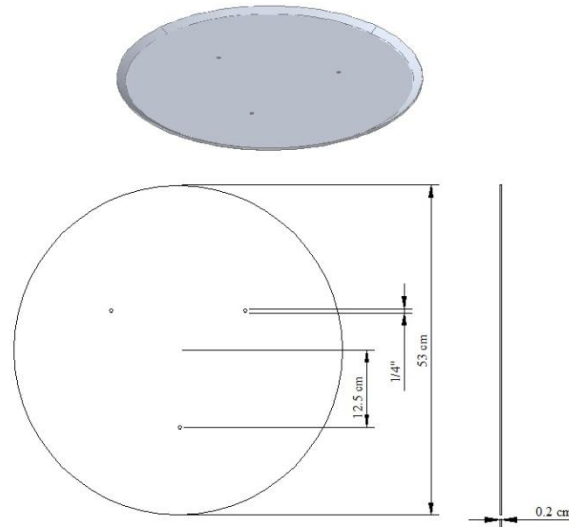


Figura 2.2: Base metálica del cocedor solar.

forma plana de la base metálica cuando soporte la olla y se caliente, de no ser así, el contacto entre estas piezas decaerá junto con el transporte de calor por conducción entre ellas.

La base metálica tiene un peso de  $0.826 \pm 0.004$  kg. En la Figura 2.2 se presenta el plano de esta pieza.

## 2.2 Olla de presión

Comparada con otras ollas de presión disponibles en el mercado, la que se eligió para este trabajo presenta las siguientes ventajas: es liviana, fácil de usar y lavar, tiene un sistema de seguridad confiable y se puede operar con fuentes de calor eléctricas.

La olla está pintada de color negro mate, con la misma pintura que se pintó la base. Tiene un peso de  $1.576 \pm 0.007$  kg y una capacidad de 5 L, aunque hay que recordar que el cocedor se ha diseñado solo para 4 L. Es de aluminio, tiene 3 válvulas de seguridad, un indicador de presión y una ventana doble de seguridad. Se le recortaron los mangos para que cupiera dentro de la cúpula y se le adaptó otra asa para poder abrirla.



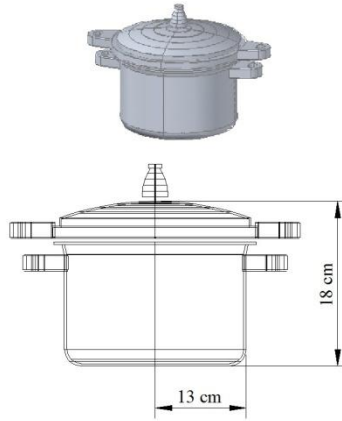


Figura 2.3: Olla de presión de capacidad de 5 L.

Hay que recordar que este tipo de ollas alcanzan presiones mayores a la atmosférica, permitiendo que la temperatura de ebullición del agua sobrepase los 100 °C, esto propicia que la temperatura de cocción se pueda alcanzar antes de que ocurra el cambio de fase, aprovechando así toda la energía que logra llegar hasta la olla para el calentamiento y cocción de los alimentos. En la Figura 2.3 se presentan las medidas de esta pieza.

## 2.3 Cúpula transparente

La cúpula debe ser transparente para permitir el paso de la radiación solar hacia el interior del cocedor, se espera que como la mayoría de los sólidos, sea opaca para a la radiación infrarroja y cree un efecto invernadero. La cúpula tiene forma semiesférica con un polígono de 20 lados como base. Dicha base está hecha de lámina para mejorar el sello formado con la carcasa.

Para la construcción de la cúpula se uso alambre de cobre calibre 10, un plástico transparente que soporta temperaturas de hasta 200 °C, usado para hornear pavos, y lámina de aluminio de calibre 18. Para fijar el plástico al alambre y la lámina se empleó silicón, éste último también soporta altas temperaturas. La cúpula es móvil y encaja en una canaleta que tiene la carcasa. En la Figura 2.4 se presenta el plano de la cúpula.

La transmitancia de la cúpula,  $\tau_{plástico}$ , se midió con el radiómetro mostrado en la Figura 2.5.

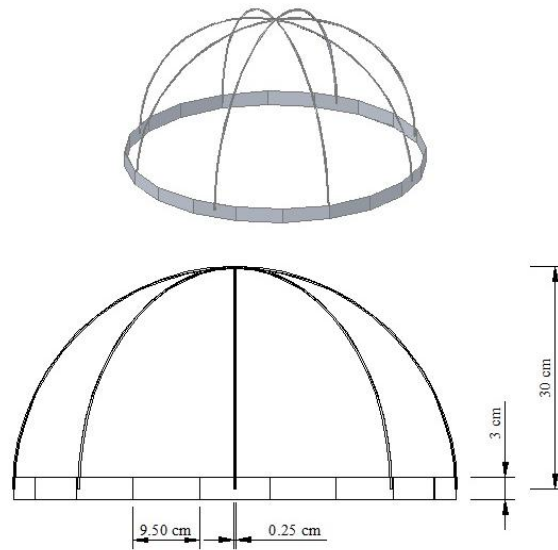


Figura 2.4: Cúpula del cocedor solar.

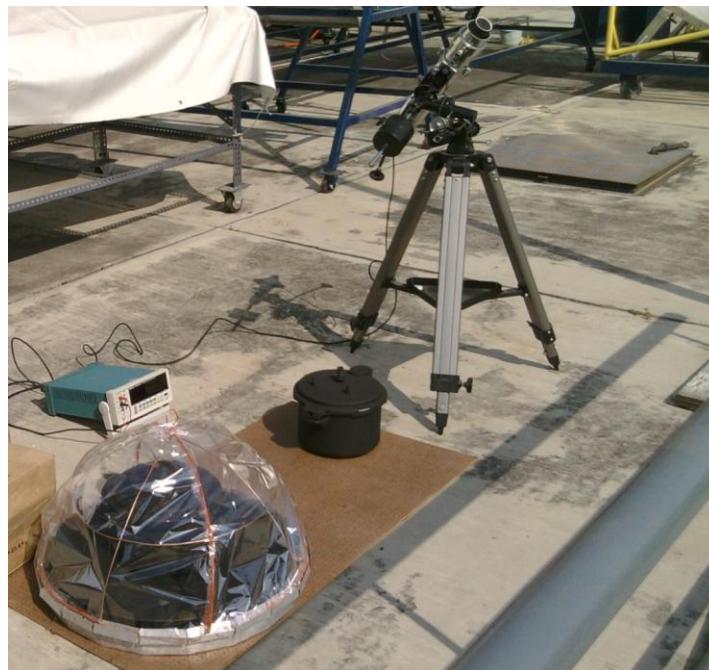


Figura 2.5: Fotografía de la configuración de la determinación de  $\tau_{plástico}$ .

El radiómetro cuenta con una termopila que produce una diferencia de potencial directamente proporcional a la intensidad de la radiación solar.

Para la determinación, se tomó una muestra del material con la que se obstruía de manera intermitente la mirilla del radiómetro. Se registró la intensidad

Obstruida (mV)	Sin obstruir (mV)	$\tau_{plástico}$
38.00	56.00	0.679
39.00	57.00	0.684
54.00	78.00	0.692
58.00	84.00	0.690
54.00	77.00	0.701
57.00	82.00	0.695
57.20	82.00	0.698
58.26	83.00	0.702
55.61	77.79	0.715
57.43	83.19	0.690
54.17	78.12	0.693
47.69	68.12	0.700
51.64	75.10	0.688
51.19	73.19	0.699
56.73	81.15	0.699
51.00	73.82	0.691
55.54	79.63	0.698
48.76	70.39	0.693
52.39	73.38	0.714
44.19	63.20	0.699
50.88	72.33	0.703
48.16	63.33	0.760
47.58	68.77	0.692
46.20	66.75	0.692
43.22	63.79	0.678
	Promedio	$0.698 \pm 0.015$

Tabla 2.1: Determinación de la transmitancia del plástico con el que se hizo la cúpula,  $\tau_{plástico}$ .

de radiación solar con y sin la mirilla obstruida, finalmente con el cociente de estas se calculó la transmitancia del material. En la Tabla 2.1 se muestran los datos obtenidos durante la prueba y como se obtuvo un valor de 0.698 en promedio para  $\tau_{plástico}$  con una desviación estándar de 0.015. Hay que mencionar que al usar este valor se omiten los efectos que el ángulo de incidencia y temperatura producen en el mismo.

En cuanto a la emitancia, la literatura se reporta un valor de 0.94 para plásticos como este.

## 2.4 Carcasa de aluminio

La carcasa es la parte del fondo del cocedor que sirve para darle forma y soportarlo, se hizo con lámina de aluminio calibre 18. Para su fabricación solo es necesario hacer dobleces y remachar; tiene un peso de  $0.332 \pm 0.002$  kg.

La carcasa tiene forma de prisma con una base de 20 lados. En la orilla superior tiene una canaleta por la parte exterior que sirve para soportar la cúpula. En la Figura 2.6 se presenta la carcasa del cocedor con sus medidas.

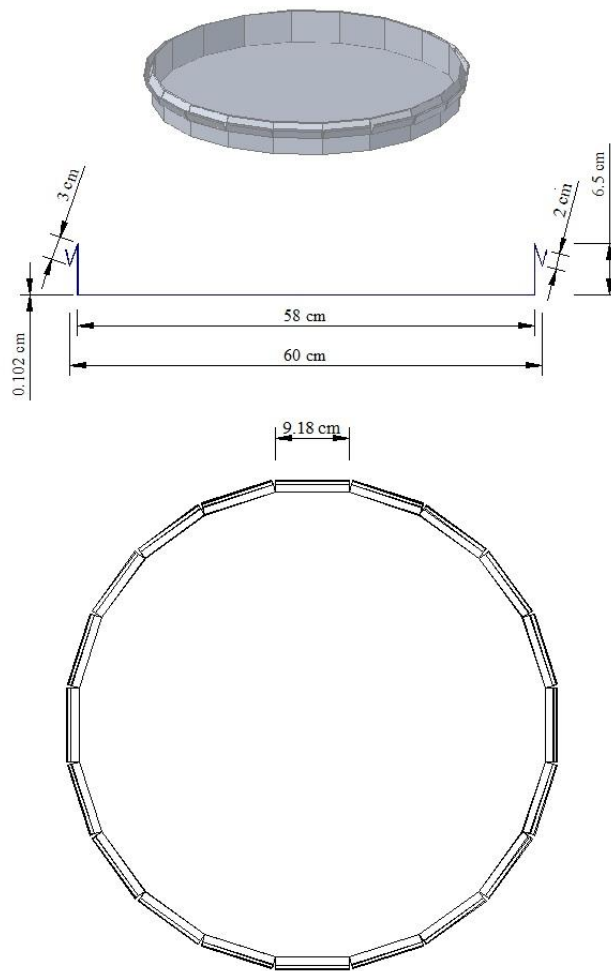


Figura 2.6: Carcasa del cocedor solar.

## 2.5 Sistema de respaldo eléctrico

El respaldo eléctrico es el presentado en el trabajo de tesis “Control automático del proceso de cocción en un cocedor solar” [4]. Este se encarga de que la temperatura del cocedor sea mayor a la de cocción, de esta manera si la radiación se interrumpe o no es suficiente la comida igual se cocerá.

El respaldo eléctrico se compone principalmente de un sensor de temperatura que registra la variable de entrada al sistema, un controlador que procesa dicha variable, y un actuador que recibe la instrucción del controlador para encender o no el circuito de la resistencia eléctrica.

El sensor es un termodiodo modelo LM135 de la marca National Semiconductor. Entre sus características están: una buena precisión ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ), respuesta lineal, fácil calibración y bajo costo. El rango de temperatura de operación va de los  $-55^\circ\text{C}$  hasta los  $150^\circ\text{C}$  y tiene un voltaje de salida de  $10\text{ mV/K}$ .

El controlador es de lazo cerrado, tiene como elemento central una tarjeta Arduino, en esta se programan y ejecutan las instrucciones para llevar a cabo el proceso de control. La tarjeta Arduino además tiene comunicación serial-USB con la que se pueden visualizar y capturar datos con una computadora.

El actuador está compuesto por un triac, un optoacoplador y un calentador resistivo, este último está dentro del cocedor en contacto directo con la base de metal y soportado con un plato de barro.

El funcionamiento del sistema de respaldo eléctrico se presenta en el diagrama de flujo del la Figura 2.7 [4]. Primero hay que fijar  $T_p$ , que es la temperatura de cocción de los alimentos, y el intervalo de precalentamiento  $t_p$ , que es lapso de tiempo en el que el cocedor funcionará solo con energía solar. Estos dos son ajustables a las necesidades del usuario, pero para este trabajo  $T_p$  tiene un valor de  $90^\circ\text{C}$  y  $t_p$  de  $2\text{ h}$ , así pues durante esas dos primeras horas de precalentamiento el control solo registra el inicio del proceso de cocción y monitorea la temperatura del cocedor  $T_c$ . Cuando el tiempo transcurrido es mayor a  $t_p$  el control compara  $T_c$  con  $T_p$ , si la temperatura del cocedor es menor a la de

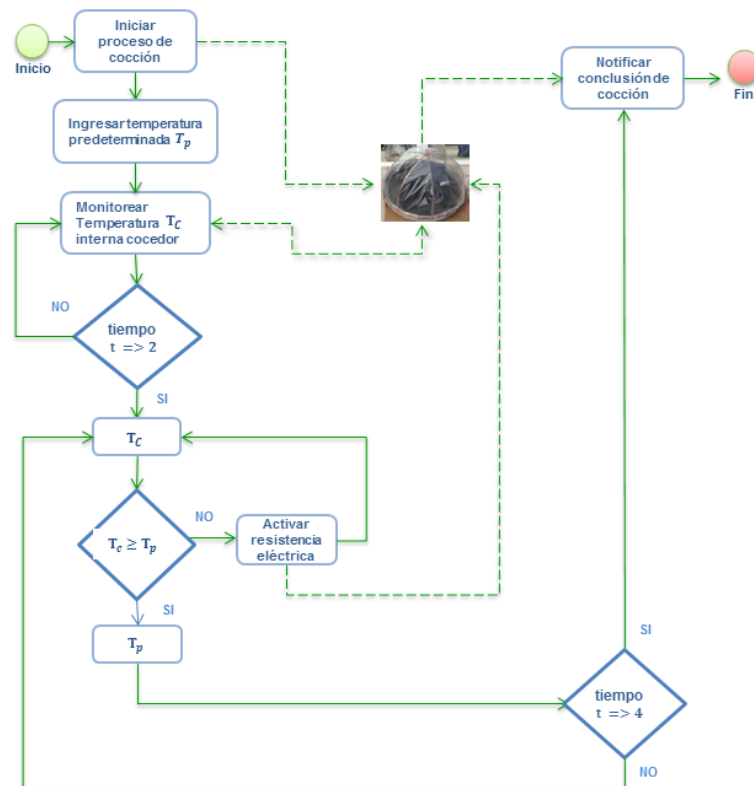


Figura 2.7: Diagrama de flujo de la programación del cocedor solar.

cocción,  $T_c < T_p$ , se enciende la resistencia eléctrica hasta que sean iguales. Por otro lado, si  $T_c \geq T_p$ , el calentador eléctrico no se activa. El controlador hace esta comparación cada minuto durante las siguientes dos horas, que es el tiempo que se ha designado para que los alimentos se cuezan.

La programación del algoritmo requiere de varias librerías e instrucciones para establecer comunicación con los elementos de hardware. Esto se realizó en el entorno de desarrollo integrado de Arduino para Linux en la distribución de Ubuntu. Este se descarga de manera libre del sitio web de Arduino.

El hecho de que el sistema de control use como variable de entrada la temperatura del cocedor,  $T_c$ , para determinar si encender o no el sistema de calentamiento eléctrico que finalmente ajusta dicha temperatura, hace que se le denomine control de lazo cerrado.

Para la introducción de los parámetros  $T_p$  y  $t_p$ , el sistema de respaldo cuenta con una pantalla de cristal líquido y un teclado matricial conectados a la tarjeta Arduino.

## 2.6 Sistema de concentración solar

La función del sistema de concentración es aumentar el área de apertura del cocedor, así se recibe radiación solar que luego redirige a la base metálica, captador.

El sistema de concentración solar es muy simple y se compone de 2 espejos planos comunes, estos tienen adaptado un trinquete con el cual se puede ajustar su ángulo de inclinación  $\beta$ . Está hecho con perfiles de aluminio y cuenta con dos bisagras para darle movilidad. En la Figura 2.8 se pueden observar las estructuras con las medidas de sus componentes.

Basta con deslizar la guía de 43 cm por el riel horizontal y asegurarlo con un tornillo para ajustar el ángulo de inclinación del espejo. Con las pruebas experimentales se pudo observar que es necesario ajustar ese ángulo por lo menos una vez por semana.

Los espejos utilizados para el sistema de concentración solar son de los que se encuentran en cualquier vidriería, así que, en caso de romperse, remplazarlos es muy fácil y de bajo costo.

Otro factor importante es el mantenimiento del sistema de concentración solar, este no requiere de cuidados especializados e incluso limpiarlos no implica ningún cuidado diferente al de cualquier espejo en el hogar.

La reflectancia del espejo,  $\rho_{espejo}$ , se determinó con un espectrofotómetro UV-3101PC de la marca Shimadzu; usando una muestra del espejo se determinó su reflectancia en espectro de 350 nm a 2500 nm, con un paso de 2 nm y una precisión de 0.2 %.

Una vez que se obtuvo la reflectancia espectral, se consultó la distribución espectral de la radiación solar con 1.5 AM, reportada por la American Society for Testing Materials (ASTM), con estas, se calculó cuanta energía reflejaba el espejo

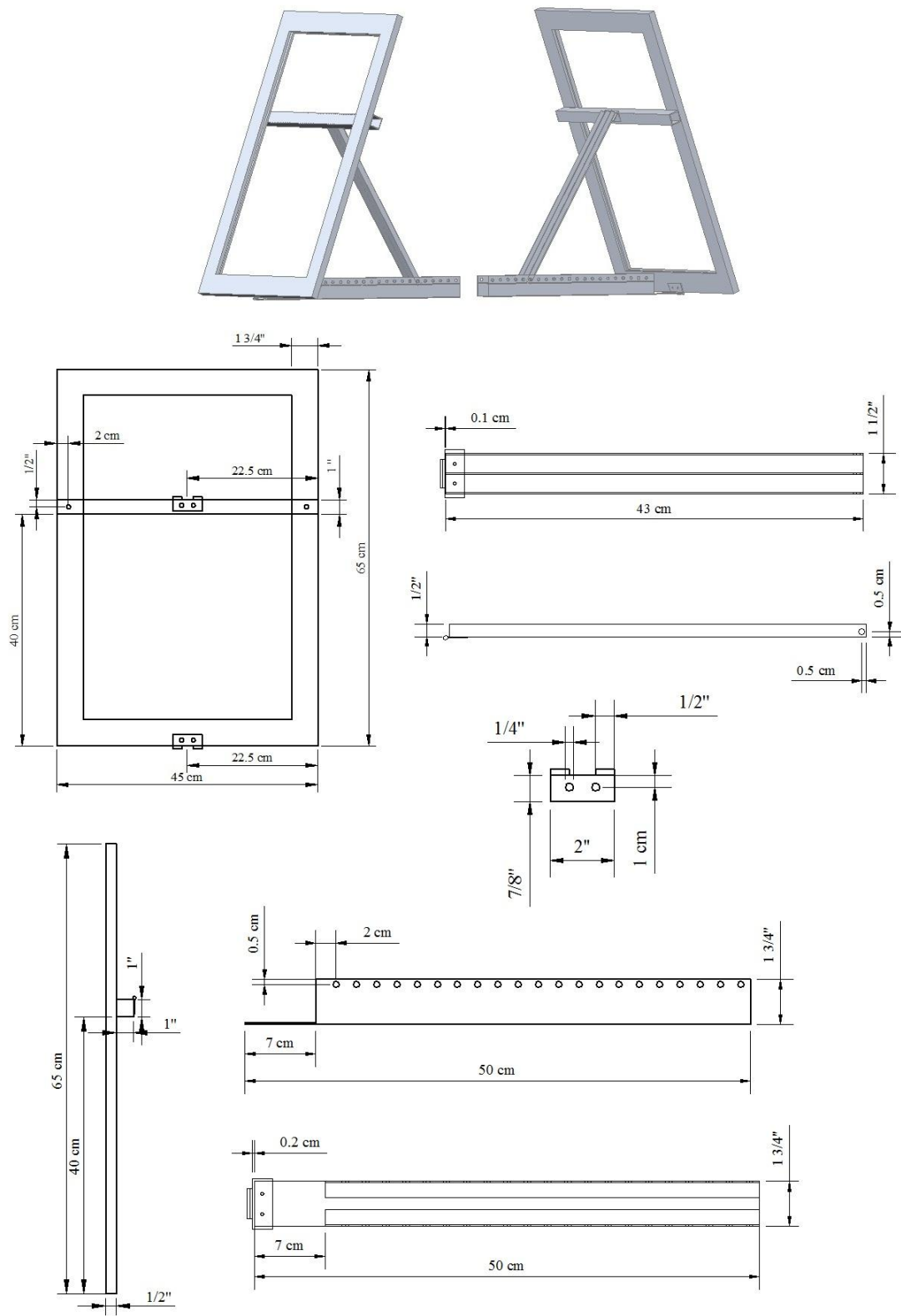


Figura 2.8: Sistema de concentración solar del cocedor.



para cada longitud de onda; al final, el cociente de la suma de la energía reflejada entre la que irradia el Sol, dio que el valor de  $\rho_{espejo}$  es de  $0.84366 \pm 0.000007\%$ . Como la incertidumbre calculada es menor que la del instrumento, se toma esta última como incertidumbre de la reflectancia,  $0.844 \pm 0.2\%$ , o lo que es igual,  $0.844 \pm 0.002$ .

En la Tabla 2.2 se muestran los parámetros necesarios para resolver el modelo termodinámico que se presenta en el siguiente capítulo, estas propiedades se consideran constantes a lo largo de la operación del cocedor solar. Los datos que no fueron medidos o propios del diseño del cocedor se tomaron de las fichas técnicas de los materiales y de las referencias [3],[5],[6] y [11].

Ahora que se han detallado los componentes del cocedor solar, en el siguiente capítulo se procede a describir el modelo termodinámico propuesto para predecir la evolución de la temperatura de los alimentos.

Propiedades térmicas			
$C_{v,olla}$ (J/K)	1,420	$C_{p,aluminio}$ (J/kgK)	903
$C_{v,base\ metálica}$ (J/K)	745	$C_{p,plástico}$ (J/kgK)	$1 \times 10^3$
$C_{v,plástico}$ (J/K)	30	$C_{p,agua}$ (J/kgK)	4,186
$C_{v,agua}$ (J/K)	16,880	$C_{p,aire}$ (J/kgK)	1,009
$C_{v,aire}$ (J/K)	77.6	$k_{aluminio}$ (W/mK)	237
$C_{v,carcasa}$ (J/K)	299	$k_{aire}$ (W/mK)	$2.63 \times 10^{-2}$
$C_{v,c}$ (J/K)	19,460	$k_{plástico}$ (W/mK)	0.25
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	25		
Propiedades ópticas			
$\alpha_{pintura}$	0.85	$\tau_{plástico}$	0.6978
$\epsilon_{pintura}$	0.91	$\rho_{espejo}$	0.844
$\epsilon_{plástico}$	0.94		
Medidas			
$m_{olla}$ (kg)	1.576	$d_{aire}$ (m)	$3 \times 10^{-2}$
$m_{base\ metálica}$ (kg)	0.826	$d_{carcasa}$ (m)	$1.02362 \times 10^{-3}$
$m_{cúpula}$ (kg)	0.020	$d_{base\ metálica}$ (m)	$2.053 \times 10^{-3}$
$m_{agua}$ (kg)	4.000	$d_{plástico}$ (m)	$5.08 \times 10^{-5}$
$m_{carcasa}$ (kg)	0.332	$r_{cocedor}$ (m)	0.3
$m_{aire}$ (kg)	$7.67 \times 10^{-2}$	$r_{base\ metálica}$ (m)	0.265
$l_{espejo}$ (m)	0.560	$r_{in,cúpula}$ (m)	0.3
$a_{espejo}$ (m)	0.360	$h_{olla}$ (m)	0.180
		$r_{olla}$ (m)	0.130

Tabla 2.2: Propiedades térmicas, ópticas y dimensiones del cocedor solar.



### 3. Modelo termodinámico del cocedor solar

En este capítulo se presenta el modelo termodinámico con el cual se busca determinar la temperatura de los alimentos durante la operación del cocedor solar. Este toma como variables de entrada: la radiación solar directa, la global, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la geoposición del cocedor, la fecha y la hora de operación, así como las propiedades físicas de los materiales con que está contruidos y las dimensiones de sus componentes. La finalidad de contar con un modelo termodinámico es determinar el funcionamiento del mismo, variando cualquiera de las variables mencionadas, antes de llevarlo a la realidad, por ejemplo variar materiales o la localización del cocedor solar.

Antes de comenzar a desarrollar el modelo es importante mencionar algunas de las suposiciones hechas para el planteamiento del mismo:

- La superficie de la base metálica, la de olla, y el interior de esta última se encuentran en equilibrio térmico. Es decir, se asume que no hay una dependencia espacial de la temperatura en estas piezas.

- La cúpula hace un sello perfecto con la carcasa y no permite la entrada ni salida de aire

- Las propiedades termofísicas de los materiales sufren cambios tan pequeños en el rango de temperaturas de trabajo que se les considera constantes.

- No hay cambio de fase del agua en el interior de la olla ya que la temperatura de cocción de los alimentos está por debajo de la de saturación en una olla de presión.

Ahora bien, para empezar se parte con la primera ley de la termodinámica y se aplica un balance de energía al cocedor, ecuación 3.1.

$$\dot{E}_{acumulada} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale}.$$

3.1

Donde  $\dot{E}_{acumulada}$  es la energía que se acumula,  $\dot{E}_{entra}$ , la que entra y  $\dot{E}_{sale}$ , la que sale, todas con respecto al tiempo, por lo que se expresan en  $W$ .

En las siguientes secciones se desarrollan cada uno de los términos de este balance.

### 3.1 Energía acumulada

La energía que se acumula se describe con

$$\dot{E}_{acumulada} = C_{v,c} \frac{dT_c}{dt}. \tag{3.2}$$

donde  $T_c$  es la temperatura del cocedor en  $K$ ,  $t$  es el tiempo en  $s$  y  $C_{v,c}$ , la capacidad calorífica del cocedor, esta última se calcula sumando las capacidades caloríficas de todos los componentes del sistema, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_{v,c} = C_{v,olla} + C_{v,comida} + C_{v,carcasa} + C_{v,cúpula} + C_{v,base\ metálica} + C_{v,aire}, \tag{3.3}$$

están en  $J/kg$ , y se calculan con la masa de cada componente,  $m_i$ , y el calor específico del material del que están hechos,  $C_{p,i}$ .

Luego de hacer el cálculo se obtiene un valor de  $19,460 \pm 80$   $J/K$  para  $C_{v,c}$ .

### 3.2 Energía que entra

En la energía entrante se identifican dos diferentes mecanismos:

$$\dot{E}_{entra} = \dot{E}_{solar\ incidente} + \dot{E}_{solar\ reflejada}, \tag{3.4}$$

donde:  $\dot{E}_{solar\ incidente}$  es la radiación solar que incide en el cocedor, mientras que  $\dot{E}_{solar\ reflejada}$ , la que llega al mismo luego de ser redireccionada por los espejos del

concentrador. En las siguientes secciones se presentan las ecuaciones para la estimación de cada una.

### 3.2.1 Energía solar incidente

La energía solar incidente,  $\dot{E}_{solar\ incidente}$ , se calcula con la radiación global como se muestra en la siguiente relación:

$$\dot{E}_{solar\ incidente} = \dot{I}_g \alpha_{pintura} \tau_{plástico} A_{captación},$$

3.5

donde  $\dot{I}_g$  es la radiación global incidente en  $W/m^2$ ,  $\alpha_{pintura}$  la absorbancia de la pintura,  $\tau_{plástico}$  es la transmitancia del material con que está hecha la cúpula, plástico en este caso, y  $A_{captación}$ , el área de captación del cocedor, es decir, el área de la base metálica.

El área de captación,  $A_{captación}$ , es el área de la base metálica, la cual se calcula con la fórmula para obtener el área de un círculo y da de  $0.220 \pm 0.006 m^2$ .

Según la literatura la pintura negro mate comercial, como la que se usó para construir el cocedor solar, tiene una absorbancia,  $\alpha_{pintura}$ , de 0.85.

Se puede observar que el producto  $\alpha_{pintura} \tau_{plástico}$  funciona como una eficiencia para la energía solar incidente en la ecuación 3.5, la cual puede expresarse como:

$$\eta_{\dot{E}_{solar\ incidente}} = \alpha_{pintura} \tau_{plástico}.$$

3.6

Por considerar las superficies como cuerpos grises, la  $\eta_{\dot{E}_{solar\ incidente}}$  se mantiene constante a lo largo del proceso de cocción con un valor de 0.593.

### 3.2.2 Energía solar reflejada

Hay que recordar que, de la radiación solar, solo la directa se puede concentrar, por lo que la energía solar reflejada,  $\dot{E}_{solar\ reflejada}$ , se calcula con la siguiente ecuación:

$$\dot{E}_{solar\ reflejada} = \dot{I}_b A_{espejos} \cos(\theta) \rho_{espejo} \alpha_{pintura} \tau_{plástico} \frac{A_{interceptada}}{A_{imagen}}, \quad 3.7$$

donde  $\dot{I}_b$  es la radiación solar directa,  $A_{espejos}$  el área total de los espejos,  $\theta$  el ángulo formado entre la normal del espejo y el vector de propagación de la radiación solar,  $\rho_{espejo}$  es la reflectancia del espejo,  $A_{imagen}$  es el área de la imagen proyectada por los espejos a la altura de la base metálica del cocedor y  $A_{interceptada}$  es el área de esta base que logra ser interceptada por los rayos reflejados por el espejo.

El área de los espejos usados,  $A_{espejos}$ , es de  $0.403 \pm 0.003 \text{ m}^2$ .

El ángulo formado entre el vector normal del espejo y el vector solar,  $\theta$ , se calcula con la siguiente ecuación:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z) \cos(\beta) + \sin(\beta) \sin(\theta_z) \cos(\gamma_s - \gamma), \quad 3.8$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital,  $\gamma_s$  el ángulo acimutal,  $\beta$  es la inclinación del espejo con respecto al suelo y  $\gamma$  el ángulo acimutal del espejo, es decir su desviación con respecto al sur, este último tiene un valor de 0 debido a que el espejo se orienta al sur. Todos estos ángulos están en grados.

El ángulo cenital,  $\theta_z$ , se calcula con la siguiente ecuación:

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\phi), \quad 3.9$$

donde  $\phi$  es la latitud a la que se encuentra el cocedor en grados,  $18.85^\circ$  para este caso,  $\delta$  es la declinación y  $\omega$  es el ángulo horario.

La declinación,  $\delta$ , es el ángulo formado entre el la dirección de los rayos solares y el plano ecuatorial, se calcula con la relación

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{284+N}{365}\right), \quad 3.10$$

donde  $N$  es el día juliano es el día del año sin tomar en cuenta la separación de meses, es por eso que va desde 1 a 365.

El ángulo horario,  $\omega$ , toma el valor de  $0^\circ$  a las 12 horas solar, es negativo hacia el este y positivo hacia el oeste, avanza a  $15^\circ$  cada hora y se calcula con la siguiente ecuación

$$\omega = 23.45^\circ (t_{sol} - 720),$$

3.11

donde  $t_{sol}$  es el tiempo solar en minutos, las 12 horas solar es cuando el Sol está en su punto más alto del día y se calcula como sigue:

$$t_{sol} = t_{est} + 4(L_{est} - L_{loc}) + V + E,$$

donde  $t_{est}$  es el tiempo estándar del reloj en minutos,  $L_{est}$  es la longitud del meridiano estándar en grados, el que se usa para determinar la hora estándar y con un valor de  $-90^\circ$  para este caso,  $L_{loc}$  es el meridiano local en grados,  $-99.21^\circ$ ,  $V$  es una constante que toma valor de 0 si se está en el horario de verano y  $-60$  si no es así,  $E$  es conocida como la ecuación del tiempo en minutos y se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = 229.2 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B)),$$

3.12

donde

$$B = (N - 1) \frac{360}{365}$$

3.13

El ángulo acimutal,  $\gamma_s$ , es la desviación del vector solar con respecto al sur, este toma valores negativos hacia el este y positivos hacia el oeste, o sea que toma valores que van desde  $-180^\circ$  hasta  $180^\circ$  y se calcula como sigue



$$\gamma_s = C_1 C_2 \gamma'_s + C_3 \left( \frac{1 - C_1 C_2}{2} \right) 180^\circ,$$

3.14

donde  $\gamma'_s$  se calcula con

$$\sin \gamma'_s = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z}.$$

3.15

El valor de las constantes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  se determinan con los siguientes criterios:

Si  $\left| \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \right| > 1$  y a su vez  $|\omega| < \cos \left( \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \right)$  entonces  $C_1 = 1$ , si no  $C_1 = -1$ .

Si  $\phi(\phi - \delta) \geq 0$  entonces  $C_2 = 1$ , si no  $C_2 = -1$ .

Si  $\omega \geq 0$  entonces  $C_3 = 1$ , si no  $C_3 = -1$ .

El cálculo de la inclinación del espejo,  $\beta$ , se hace para cada día del año y se calcula de tal manera que para cuando el Sol está en su punto más alto, es decir a las 12 horas tiempo solar, la imagen que proyecte en el plano de la base metálica la cubra por completo. El hecho de hacer el cálculo en ese momento del día asegura que la base metálica sea cubierta a lo largo de la operación del cocedor en el eje x. La ecuación con que se calcula  $\beta$  es la siguiente:

$$\frac{\sin(\theta_z - \beta + 90)}{2r_{\text{cocedor}}} - \frac{\sin(2\beta - \theta_z - 90)}{l_{\text{espejo}}} = 0,$$

3.16

donde  $r_{\text{cocedor}}$  es el radio del cocedor y  $l_{\text{espejo}}$  lo largo del espejo. Para resolver la ecuación 3.16 se hace el cálculo para valores de  $\beta$  que van desde  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , con un tamaño de paso de  $0.1^\circ$ , y se elige el que más se acerque a cero. Al calcular este ángulo para varios días seguidos se ha observado que un ajuste semanal es lo mínimo necesario.

En la Figura 3.1 se pueden observar las variables mencionadas para el cálculo de la inclinación del espejo, y es más fácil identificar como se obtuvo la ecuación 3.16, aplicando el teorema del seno.

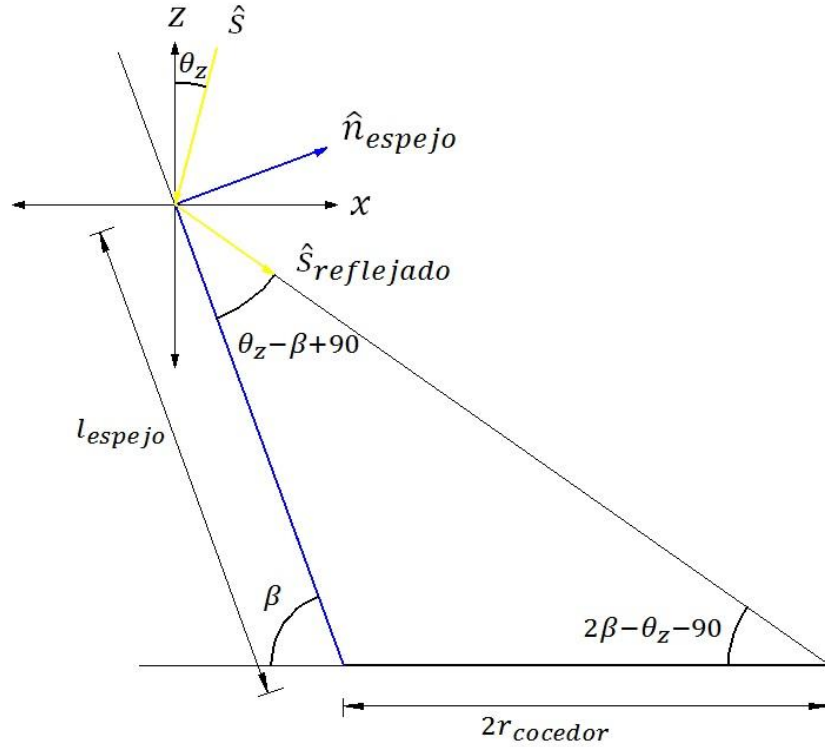


Figura 3.1: Funcionamiento del espejo a las 12 horas solar.

El área de la imagen reflejada se determina con la siguiente ecuación:

$$A_{\text{imagen}} = a_{\text{espejo}} l_{\text{imagen}},$$

3.17

donde  $a_{\text{espejo}}$  es el ancho de los espejos y  $l_{\text{imagen}}$  es lo largo de la imagen o dicho de otra manera la componente en X de la imagen. Para calcular este último se debe calcular como se refleja el vector solar en el espejo, esto se hace calculando, primero, el vector solar,  $\hat{s}$  y la normal del espejo  $\hat{n}_{\text{espejo}}$  con las ecuaciones 3.18, 3.19, respectivamente.

$$\hat{s} = \cos(\delta) \cos(\omega) \hat{i} + \cos(\delta) \sin(\omega) \hat{j} + \sin(\delta) \hat{k}.$$

3.18

$$\hat{n}_{\text{espejo}} = \sin(\beta) \cos(\gamma) \hat{i} + \sin(\beta) \sin(\gamma) \hat{j} + \cos(\beta) \hat{k}.$$

3.19

El vector reflejado se calcula con la ecuación 3.20, en esta aparece la matriz de rotación  $R(\Phi, \mathbf{n})$ , ecuación 3.21.

$$\hat{S}_{reflejado} = \hat{S}R(\Phi, \mathbf{n}),$$

3.20

donde:

$$R(\Phi, \mathbf{n}) = \begin{bmatrix} 1 - 2(n_y^2 + n_z^2)\sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) & -n_z \sin(\Phi) + 2n_x n_y \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) & n_y \sin(\Phi) + 2n_z n_x \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) \\ n_z \sin(\Phi) + 2n_x n_y \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) & 1 - 2(n_z^2 + n_x^2)\sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) & n_x \sin(\Phi) + 2n_y n_z \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) \\ -n_y \sin(\Phi) + 2n_z n_x \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) & n_x \sin(\Phi) + 2n_y n_z \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) & 1 - 2(n_x^2 + n_y^2)\sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right) \end{bmatrix}.$$

3.21

Al tomar como eje de rotación el vector  $\hat{n}_{espejo}$  y  $\Phi$  igual a  $180^\circ$ , se hace el giro necesario para determinar el vector reflejado,  $\hat{S}_{reflejado}$ . Este cálculo se realiza para la esquina superior oeste del cocedor.

Se define como  $RV$  al cociente de la distancia vertical que hay de la esquina al plano en el que está la base metálica del cocedor; y la componente en  $z$  de  $\hat{S}_{reflejado}$ , ecuación 3.22,

$$RV = \frac{\sin(\beta)l_{espejo}}{\hat{S}_{reflejado,z}},$$

3.22

este cociente es el escalar por el cual se multiplicará  $\hat{S}_{reflejado}$  para obtener sus componentes en el plano de la base metálica, como se muestra:

$$RV\hat{S}_{reflejado} = RV\hat{S}_{reflejado,x} + RV\hat{S}_{reflejado,y} + RV\hat{S}_{reflejado,z},$$

3.23

ahora que se tienen las componentes de la proyección del vector reflejado en el plano de la base metálica se tiene que

$$l_{imagen} = RV\hat{S}_{reflejado,x};$$

3.24

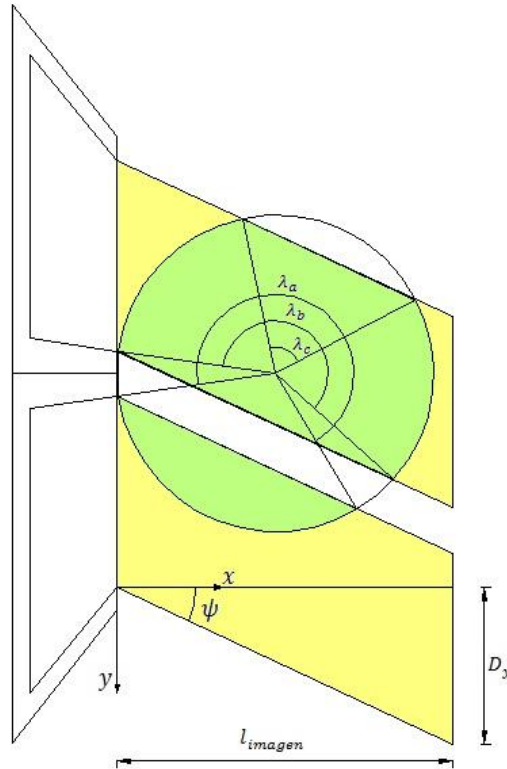


Figura 3.2: Imagen proyectada y área interceptada.

por lado  $RV\hat{S}_{reflejado,y}$  es la desviación en el eje  $y$  de la imagen proyectada a la cual se le identificará como  $D_y$  para cálculos posteriores

No toda la energía reflejada incide sobre la base metálica, y a su vez no toda la base metálica es cubierta por esta energía.  $A_{interceptada}$  es el área de la base que es interceptada por la radiación solar reflejada por el espejo y se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_{interceptada} = r_{base}^2 \left\{ \pi \left[ 1 - \frac{(\lambda_b - \lambda_a - \lambda_c)}{360} \right] - \frac{(\sin(\lambda_b) - \sin(\lambda_a) - \sin(\lambda_c))}{2} \right\},$$

3.25

donde  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$  y  $\lambda_c$  son los ángulos formados entre las líneas trazadas del centro de la base metálica a las intercepciones de las orillas de la imagen reflejada con la orilla de la misma base como se muestra en la Figura 3.2.

En la Figura 3.2 también se puede observar como los ángulos  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$  y  $\lambda_c$  dependen del ángulo  $\psi$ , el cual se puede calcular con la desviación de la imagen en

$\psi$ (°)	$A_{interceptada}$ (m <sup>2</sup> )
$0 \leq \psi < 5$	0.172
$5 \leq \psi < 10$	0.172
$10 \leq \psi < 15$	0.172
$15 \leq \psi < 20$	0.176
$20 \leq \psi < 25$	0.179
$25 \leq \psi < 30$	0.181
$30 \leq \psi < 35$	0.175
$35 \leq \psi < 40$	0.166
$40 \leq \psi < 45$	0.154
$45 \leq \psi < 50$	0.138
$50 \leq \psi < 55$	0.121
$55 \leq \psi < 60$	0.103
$60 \leq \psi < 65$	0.084
$65 \leq \psi < 70$	0.066
$70 \leq \psi < 75$	0.048
$75 \leq \psi < 80$	0.031
$80 \leq \psi < 85$	0.018
$85 \leq \psi < 90$	0.006

Tabla 3.1: Área interceptada para diferentes valores de  $\psi$ .

el eje x,  $D_y$ , y el largo de la misma,  $l_{imagen}$ , como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\tan(\psi) = \frac{D_y}{l_{imagen}}.$$

3.26

En la Tabla 3.1 se presenta el  $A_{interceptada}$  para diferentes valores de  $\psi$  obtenidos de manera empírica.

En la ecuación 3.7 se puede observar una eficiencia para la energía solar reflejada, la cual se puede expresar como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_{\dot{E}_{solar\ reflejada}} = \rho_{espejo} \alpha_{pintura} \tau_{plástico} \frac{A_{interceptada}}{A_{imagen}},$$

3.27

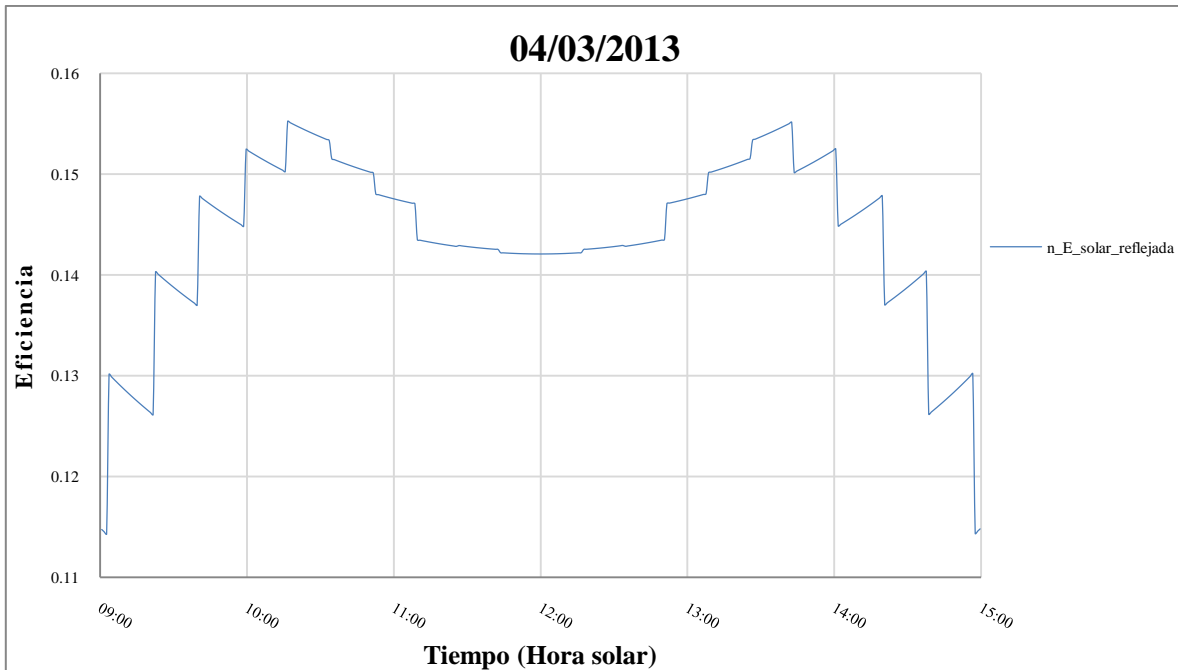


Figura 3.3: Evolución de la eficiencia de la energía solar reflejada a lo largo del día.

Esta eficiencia,  $\eta_{\dot{E}_{solar\ reflejada}}$ , cambia a lo largo del día. En la Figura 3.3 se muestran los diferentes valores que toma al avanzar el tiempo solar para el día 4 de marzo de 2013, para este día se calculó un valor de  $66.4^\circ$  para  $\beta$ .

Los saltos tan abruptos y marcados se deben a la forma en que fue calculada el área interceptada.

Ahora se hará el análisis de la energía que el cocedor solar disipa al ambiente.

### 3.3 Energía que se transfiere al ambiente

La energía que sale lo hace por tres diferentes mecanismos: conducción, convección y radiación. Los dos primeros impulsados por la diferencia de temperatura entre el cocedor y del medio ambiente,  $T_c - T_a$ , y la última por la que hay entre la temperatura del cocedor y la temperatura del cielo,  $T_c - T_s$ .

Para el análisis de la energía que sale se usa el concepto de resistencias térmicas, esto se comprende mejor observando la ecuación 3.28.

$$\dot{E}_{sale} = \frac{(T_c - T_a)}{R_{conducción-convección}} + \frac{(T_c^4 - T_s^4)}{R_{radiación}}, \quad 3.28$$

donde  $R_{conducción-convección}$  es la resistencia al transporte de energía por los mecanismos de conducción y convección en unidades de K/W; mientras que la  $R_{radiación}$  lo es para el mecanismo de radiación y está en  $K^4/W$ .

La temperatura del cielo  $T_s$ , se calcula con la siguiente ecuación [9]:

$$T_s = T_a [0.711 + 5.6 \times 10^{-3} T_{dp} + 7.3 \times 10^{-4} T_{dp}^2 + 0.013 \cos(15t_m)]^{1/4} \quad 3.29$$

donde  $t_m$  es la hora a partir de la media noche y  $T_{dp}$  es la temperatura del punto de rocío, y se calcula con la ecuación que sigue:

$$T_{dp} = \sqrt[8]{\frac{H}{100} [112 + (0.9T_a)] + (0.1T_a) - 112} \quad 3.30$$

Para la energía disipada al medio ambiente por conducción y convección se identifican dos trayectos diferentes, uno por la parte superior de la base metálica y otro por la inferior. Estos dos trayectos son paralelos, así pues la  $R_{conducción-convección}$  se describe como se muestra a continuación:

$$R_{conducción-convección} = \frac{1}{\left( \frac{1}{R_{superior}} + \frac{1}{R_{inferior}} \right)}, \quad 3.31$$

para la  $R_{superior}$  se considera que la energía se transporta unidimensionalmente de manera radial y sin generación de calor. Esta tiene que pasar por una capa de aire semiesférica hasta la cúpula, luego por la cúpula misma y finalmente se disipa al aire libre. Para la primera, se considera al aire como estático y se toma una esfera imaginaria pequeña que contenga a la olla del cocedor. Se hace la suposición que dentro de esta pequeña esfera la temperatura es homogénea e igual a  $T_{cocedor}$ . El cálculo de la energía disipada en el exterior de la cúpula es muy complejo, para simplificarla se hace la suposición de que solo se da por convección libre, y se

establece un valor de  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el coeficiente convectivo de calor, este es el valor más alto para el caso de gases [3], de esta manera se calcula una cota mínima para la temperatura.

Entonces se tiene que la  $R_{superior}$  es la suma de tres resistencias térmicas en serie, como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$R_{superior} = \frac{\frac{1}{r_{imaginaria}} - \frac{1}{r_{in,cúpula}}}{2\pi k_{aire}} + \frac{\frac{1}{r_{in,cúpula}} - \frac{1}{r_{ext,cúpula}}}{2\pi k_{plástico}} + \frac{1}{\pi r_{ext,cúpula}^2 h},$$

3.32

donde  $r_{imaginaria}$  es el radio de la esfera imaginaria y se calcula con el radio y la altura de la olla, como se muestra en la ecuación 3.33,  $r_{in,cúpula}$  y  $r_{ext,cúpula}$  son el radio interior y exterior de la cúpula de plástico en  $m$ ,  $k_{aire}$  y  $k_{plástico}$  son las conductividades térmicas del aire y el plástico en  $\text{W/mK}$  y  $h$  es el coeficiente convectivo de calor en  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

$$r_{imaginaria} = \sqrt{(h_{olla}^2 + r_{olla}^2)}$$

3.33

Por la parte inferior, la energía al fluir lo hace a través de la base metálica, una capa de aire de  $3 \text{ cm}$  y la carcasa del cocedor hasta llegar al suelo o al mueble que lo soporta, el cual se considerará a temperatura ambiente. Se hace la suposición de que el transporte de calor ocurre solo en la dirección  $z$ , por lo que se puede considerar como unidimensional y sin generación de calor.

$R_{inferior}$  es, al igual que  $R_{superior}$ , la suma de tres resistencias en serie, esto se puede observar mejor en la siguiente ecuación:

$$R_{inferior} = \frac{d_{base}}{\pi r_{base}^2 k_{aluminio}} + \frac{d_{aire}}{\pi r_{base}^2 k_{aire}} + \frac{d_{carcasa}}{\pi r_{base}^2 k_{aluminio}},$$

3.34

donde  $d_{base}$ ,  $d_{aire}$  y  $d_{carcasa}$  son los espesores de la base metálica, la capa de aire y la carcasa en  $m$ , respectivamente.



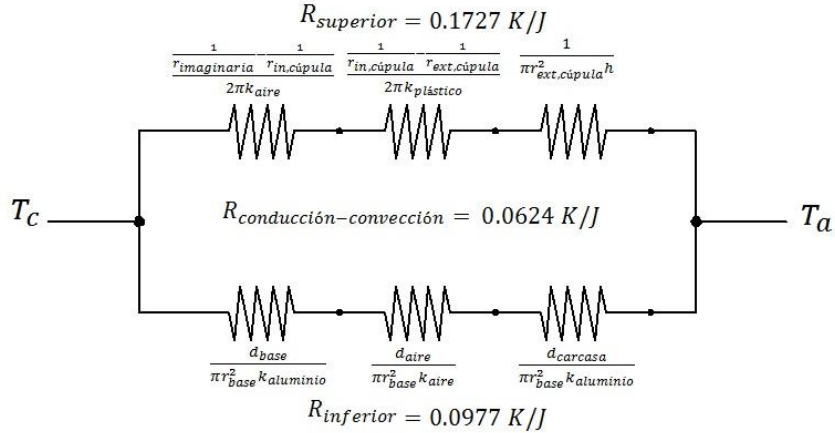


Figura 3.4: Disposición de la resistencias térmicas para el transporte de energía por conducción y convección.

En la Figura 3.4 se presenta un diagrama de las resistencias térmicas, en ella se pueden observar más claramente su disposición además de los valores calculados para las mismas.

Para calcular la energía que sale por la diferencia entre la temperatura del cocedor y la temperatura de cielo, se usa la resistencia térmica para el transporte de calor radiativo para una cavidad cerrada formada por dos superficies. Se usa primero para la cavidad formada por la base metálica y la cúpula, y luego para formada entre la cúpula y el cielo. Estas se encuentran en serie y forman la resistencia al transporte de energía por radiación,  $R_{radiación}$ , lo anterior se encuentra descrito en la siguiente ecuación:

$$R_{radiación} = \frac{1}{\sigma} (R_{base-cúpula} + R_{cúpula-cielo}),$$

3.35

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman y es igual a  $5.669 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ , por otro lado,  $R_{base-cúpula}$  y  $R_{cúpula-cielo}$  son las resistencias térmicas de la base a la cúpula y de la cúpula al cielo, respectivamente, en  $K^4/W$ .

La  $R_{base-cúpula}$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_{base-cúpula} = \frac{1-\varepsilon_{pintura}}{\varepsilon_{pintura}\pi r_{base}^2} + \frac{1}{\pi r_{base}^2 F_{base-cúpula}} + \frac{1-\varepsilon_{plástico}}{\varepsilon_{plástico}2\pi r_{in,cúpula}^2}, \quad 3.36$$

donde  $\varepsilon_{pintura}$  y  $\varepsilon_{plástico}$  son la emitancia de la pintura con que se le dio color a la base metálica y la del plástico con que se construyó la cúpula, respectivamente,  $F_{base-cúpula}$  es el factor de forma de la base a la cúpula que, por considerar una base plana, es igual a 1.

La  $R_{cúpula-cielo}$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_{cúpula-cielo} = \frac{1-\varepsilon_{plástico}}{\varepsilon_{plástico}\pi r_{ext,cúpula}^2 F_{cúpula-cielo}} + \frac{1}{2\pi r_{ext,cúpula}^2}, \quad 3.37$$

donde  $F_{cúpula-cielo}$  es el factor de forma de la cúpula al cielo que, por tratarse de una superficie convexa, es igual a 1.

En la Figura 3.5 se presenta un esquema de las resistencias para el flujo de energía por radiación, en ella se muestra su acomodo y sus valores calculados.

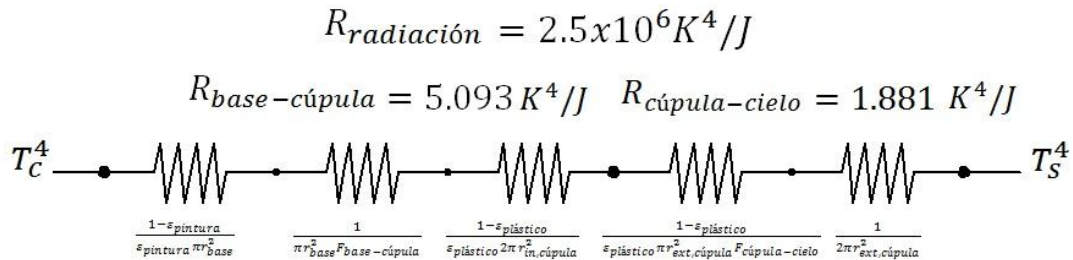


Figura 3.5: Disposición de las resistencias térmicas para el flujo de energía por radiación.

### 3.4 Solución de ecuación de balance

Ahora que se han detallado los términos de la ecuación de balance, ecuación 3.1, se puede escribir de la siguiente manera:

$$C_{v,cocedor} \frac{dT_c}{dt} = \dot{E}_{entra} - \frac{(T_c - T_a)}{R_{conducción-convección}} - \frac{(T_c^4 - T_s^4)}{R_{radiación}}, \quad 3.38$$

En esta ecuación todos los términos dependen del tiempo, y como tal, cambian al cambiar este. Así que para resolverla se procede de la siguiente forma: para la razón de cambio de la temperatura del cocedor con respecto al tiempo se puede aproximar con:

$$\frac{dT_c}{dt} \cong \frac{\Delta T_c}{\Delta t} = \frac{T_c(t_{i+1}) - T_c(t_i)}{t_{i+1} - t_i}, \quad 3.39$$

donde  $T_c(t_i)$  es la temperatura del cocedor a un tiempo inicial  $t_i$ , mientras que  $T_c(t_{i+1})$  lo es a un tiempo más adelante  $t_{i+1}$ , ambos tiempos están en segundos. Para usar esta aproximación se debe hacer la consideración que las variables que no son la temperatura del cocedor se mantienen constantes durante el intervalo de tiempo,  $t_{i+1} - t_i$ .

Regresando a la ecuación 3.39, la temperatura del cocedor también está presente al lado derecho. Es necesaria esta temperatura para determinar las pérdidas de calor durante el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , se podría usar una de las dos,  $t_{i+1}$  o  $t_i$ , pero se opta por usar un promedio de ellas, de esta manera la ecuación 3.38 pasa a ser:

$$C_{v,c} \frac{T_c(t_{i+1}) - T_c(t_i)}{t_{i+1} - t_i} = \dot{E}_{entra} - \frac{\left(\frac{T_c(t_{i+1}) + T_c(t_i)}{2} - T_a\right)}{R_{conducción-convección}} - \frac{\left(\left(\frac{T_c(t_{i+1}) + T_c(t_i)}{2}\right)^4 - T_s^4\right)}{R_{radiación}}, \quad 3.40$$

donde el intervalo de tiempo  $t_{i+1} - t_i$  se toma de 60 s, esto debido a que la estación solarimétrica del IER arroja datos suficientes como para hacer el cálculo cada minuto.

Ahora la ecuación a resolver es de cuarto orden y para esto se usa el método de Newton-Raphson:

$$T_c(t_{i+1}) = T_c(t_i) - \frac{f(T_c(t_i))}{f'(T_c(t_i))}.$$

3.41

Este método de solución propuesto requiere de una temperatura inicial,  $T_c(t_i)$ , la cual puede considerada igual a la temperatura ambiente en el momento inicial o, si se tiene, el primer dato de temperatura del cocedor de un prueba experimental.

Una vez que se tiene la temperatura del cocedor para cada minuto se pueden calcular los números característicos del cocedor, los cuales describen su desempeño y permiten hacer comparaciones con otros cocedores o con mejoras hechas al mismo.

Uno de estos números es la potencia de cocción,  $P_c$ , que representa la cantidad de energía que el cocedor acumula por segundo. Se calcula con el cambio de temperatura de interior de la olla,  $\Delta T_c$ , en un intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , y la capacidad calorífica del agua usada en la prueba,  $C_{v,agua}$ , como se muestra a continuación:

$$P_c = C_{v,agua} \frac{\Delta T_c}{\Delta t}.$$

3.42

La potencia de cocción se calcula para intervalos de 10 minutos y su comportamiento se analiza con respecto a la diferencia de temperatura entre el cocedor y el ambiente,  $\Delta T = T_c - T_a$ , esto debido a que es evidente que a temperaturas más altas y alejadas de la ambiente, al cocedor le cuesta más cocinar. Se hace una dispersión a la cual se le aplica una regresión lineal, quedando de la forma:

$$P_c = m\Delta T + P_{c,max}.$$

3.43

La ordenada al origen,  $P_{c,max}$ , es la potencia de cocción máxima debido a que es la que ocurre cuando  $\Delta T$  es igual a 0, es decir cuando no se tienen pérdidas de energía hacia el ambiente. Por otro lado, cuando la potencia de cocción sea igual

a 0, será cuando ya no es posible seguir calentando los alimentos con el cocedor, de esta manera se puede calcular la temperatura máxima que puede alcanzar el cocedor solar,  $T_{c,max}$ , como se muestra en la siguiente relación:

$$T_{c,max} = \frac{P_{c,max}}{m} + T_a.$$

3.44

La pendiente  $m$  sirve para hacer comparaciones entre cocedores, condiciones de prueba (como localidad, condiciones climáticas regionales o de estación, fechas, etc.) y mejoras que se le puedan hacer al diseño. Tiene unidades de W/K y se puede interpretar como la energía útil que se obtendrá con el cocedor a una cierta diferencia de temperatura de este con el ambiente. Este número  $m$  podría ayudar también con el análisis de la velocidad a la que se requieren cocer algunos alimentos.

Es claro, y más después de haber planteado el modelo termodinámico, que una relación lineal como esta difícilmente describe el comportamiento de un cocedor solar, es por eso que la determinación de este número  $m$  se debe hacer en condiciones especiales. Para los tipos de cocedores existentes esta prueba está estandarizada e incluso aprobada por comités, pero por ser una tecnología nueva, en este trabajo de tesis se toman algunas de las recomendaciones para adaptar lo mejor posible la prueba. A continuación se presentan las condiciones adoptadas:

- La regresión lineal debe tener un coeficiente de correlación  $R^2$  mayor a 75 %.
- La radiación solar no debe tener variaciones mayores a  $100 \text{ W/m}^2$  y debe estar entre  $450 \text{ W/m}^2$  y  $1100 \text{ W/m}^2$ .
- El reportarla cada 10 minutos ayuda a suavizar la curva.
- Las variables utilizadas deben ser promedios de los diez minutos que hay entre cada evaluación.
- El líquido de trabajo debe ser agua.

- La temperatura ambiente debe estar entre 20 °C y 35 °C, las temperaturas extremas harían que los números obtenidos no se pudieran reproducir en zonas con climas moderados.

- La temperatura del cocedor debe ser mayor a la ambiente por lo menos por 5 °C y menor 90 °C, el límite inferior asegura que haya pérdidas de calor hacia el ambiente y el superior que la prueba esté alejada del punto de saturación del agua.

- Las pruebas se deben hacer entre 10:00 y 14:00 horas tiempo solar.

Existe otro valor que se utiliza para la descripción de los cocedores solares, se llama medida única de desempeño, esta corresponde a la potencia de cocción del cocedor cuando la diferencia de temperatura entre el cocedor y el ambiente es de 50 °C. Se usa por convención y sirve para dar una idea muy general a los consumidores de la potencia del cocedor, en este trabajo se le identificará con  $P_u$ .

A pesar de que el equipo presentado en este trabajo no es el diseño final, es bueno comenzar a ubicar el dispositivo dentro de las tecnologías existentes con estos parámetros.

Si en la ecuación 3.42 no se divide entre el intervalo de tiempo, se tiene la energía útil captada por el cocedor solar,  $E_u$ , se le denomina útil porque es la energía que sirve para el fin deseado, que es calentar el contenido de la olla. Si esta energía útil se divide entre la energía disponible, se obtiene la eficiencia del cocedor solar,  $\eta_c$ , como se muestra en la siguiente relación:

$$\eta_c = \frac{E_u}{E_d} = \frac{C_{v,agua} \Delta T_c}{I_g A_{captación} + I_b A_{espejos} \cos(\theta)},$$

3.45

Al igual que la potencia de cocción,  $\eta_c$  se ve afectada por la diferencia entre la temperatura del cocedor solar y la del ambiente, es por eso que también se presenta en una dispersión  $E_u$  contra  $\Delta T = T_c - T_a$ .

Si se evita que entre energía al cocedor solar, el cambio de la temperatura en el interior será provocado completamente por la energía que sale,  $\dot{E}_{sale}$ , como se muestra:

$$\dot{E}_{sale} = \frac{c_{v,agua}\Delta T_c}{\Delta t} = \frac{(T_c - T_a)}{R_{total}}.$$

3.46

Ahora, si se hace una dispersión de  $\dot{E}_{sale}$  contra  $\Delta T = T_c - T_a$ , se puede obtener una regresión lineal, de la cual la pendiente es un coeficiente de enfriamiento, que también se puede interpretar como una resistencia total a la transferencia de energía al ambiente, por esto se le denominará CR. La regresión lineal se expresa entonces como sigue:

$$\dot{E}_{sale} = CR(\Delta T),$$

3.47

donde  $CR$  tienen unidades de W/K. En esta ecuación la ordenada al origen debe ser 0, debido a que cuando  $\Delta T$  es igual a 0 no hay intercambio de energía en forma de calor con el ambiente.

Como en los casos anteriores, es difícil expresar con una ecuación lineal algo tan complejo como la dispersión de energía hacia el ambiente. Sobre esto la literatura argumenta que al tratarse temperaturas relativamente bajas, la pérdida de energía por el mecanismo de radiación es pequeño, por lo que los predominantes son los de convección y conducción, que si son lineales.

Al aumentar la temperatura del cocedor se hace más grande la diferencia entre esta y la temperatura ambiente, en consecuencia, las pérdidas de calor son mayores, por lo que  $\dot{E}_{salida}$  aumenta. Por otro lado, la energía que sirve para el fin del dispositivo es menor haciendo que la  $P_c$ ,  $E_u$  y la  $\eta_c$  disminuyan.

Ahora que se ha presentado lo necesario para realizar una evaluación teórica, se prosigue con la planeación de la etapa experimental en el siguiente capítulo.







## 4. Desarrollo experimental

Luego de construir el dispositivo se procedió a realizar las evaluaciones experimentales. En este capítulo se presentan los objetivos y los preparativos necesarios para desarrollar la etapa experimental, como el diseño de las pruebas y la instrumentación necesaria.

La etapa experimental se llevó a cabo en la plataforma solar del IER de la UNAM, en una zona segura donde no hubiera sombreamientos.

### 4.1 Objetivos de la evaluación experimental

Los objetivos de la evaluación experimental son varios y todos giran en torno a observar el comportamiento real del cocedor solar, a continuación se analizan cada uno de ellos.

Con las pruebas experimentales, es posible comparar los resultados predichos por el modelo teórico con los obtenidos de manera experimental, observar en que momentos hay discrepancias entre ellos y tratar de dar una explicación a las mismas.

Es posible que, en el modelo termodinámico, no se le haya dado el peso específico correcto a alguno de los diferentes fenómenos físicos que ocurren durante el proceso de cocción, las pruebas experimentales son la mejor manera de evidenciar los desacuerdos entre el modelo y los dispositivos.

A pesar del esfuerzo invertido en el proceso de diseño y construcción, es posible que existan aún mejoras que se le puedan hacer al cocedor solar, y la etapa experimental es una muy buena oportunidad para identificarlas.

Durante el uso del cocedor solar se alcanzan condiciones de temperaturas y presiones altas que pueden llegar a ser peligrosas para el usuario. Así pues, identificar situaciones de riesgo en la operación del dispositivo es otro aspecto importante a determinar en las corridas experimentales.

Para las pruebas experimentales se puede medir la temperatura del contenido de la olla colocando un sensor temperatura en su interior, sin embargo, el sensor de temperatura del sistema de respaldo eléctrico del cocedor no puede estar en contacto con los alimentos, esto debido a varias razones que van desde la ergonomía e higiene, hasta la funcionalidad del sensor. Es por eso que es de suma importancia identificar una región donde la temperatura sea representativa de lo que ocurre dentro de la olla.

Al igual que para el cocedor solar, las pruebas experimentales sirven para observar el funcionamiento del sistema de respaldo eléctrico. La observación de su comportamiento ofrece la posibilidad de detectar variables, errores y/o mejoras no contempladas durante su diseño.

Un objetivo importante de hacer las pruebas experimentales y sus respectivos análisis, es obtener los números característicos con los que se podrá comparar con otros cocedores o incluso con mejoras hechas a este mismo.

El hecho de hacer las pruebas a la intemperie permite observar el efecto de las condiciones del exterior sobre el cocedor, que es lo que se presenta en su uso normal.

## 4.2 Diseño de las pruebas experimentales

Para hacer las pruebas se eligieron días pronosticados con poca o nula nubosidad y se comenzaban entre las 9 y 11 de la mañana, procurando que fuera antes de las 12 horas solar y emulando el uso que le podría dar un usuario.

No se usaron alimentos para disminuir las variables que afectan el sistema y evitar el desperdicio del mismo. En su lugar se uso agua que tiene una capacidad calorífica casi 4 veces mayor que el de la comida, esto ayuda a contemplar el gasto energético de los procesos fisicoquímicos de la cocción no contemplados en el modelo y, en el peor de los casos, aportaría una discrepancia que desembocaría en un sobredimensionamiento del sistema. Además, según la literatura, usar agua como fluido de trabajo es una práctica común en la evaluación experimental de cocedores solares [6].

Los espejos se limpiaron al inicio de cada prueba para evitar causar un error por baja reflectividad. Además se hizo el cálculo y ajuste del ángulo de inclinación,  $\beta$ , para el día de cada prueba.

Para la alineación de los espejos se usaron las marcas de norte geográfico presentes en la plataforma solar, las cuales fueron corroboradas más de una vez con la sombra proyectada por un objeto con tiro vertical a las 12 horas solar.

La capa de plástico de la cúpula se reemplazó cuando esta presentaba una apariencia turbia, debido a que esto disminuye la transmitancia y afecta al experimento de manera considerable.

En un principio los espejos fueron diseñados para estar fijos al piso, la imposibilidad de fijarlos en la plataforma solar hizo que fuera necesario colocar contrapesos en el riel del trinquete para evitar fueran movidos o derribados por el viento.

Hay que recordar que el sistema de respaldo eléctrico se desarrolló a la par del cocedor solar, por lo que, al igual que este último, se encuentra en su etapa de prueba.

Siempre debe haber alguien presente cuando la prueba se corra con el sistema de respaldo eléctrico. La presencia de la resistencia eléctrica agrega un factor de riesgo importante ya que, de fallar el control, este suministraría energía de manera desmedida al cocedor, poniendo en riesgo al equipo. Las altas temperaturas que se alcanzarían pondrían dañar los sensores y por otro lado se produciría vapor, que de salir de la olla, podría dañar el plástico de la cúpula ensuciándolo. Cuando se pruebe con alimentos es todavía más peligroso, estos podrían tapar las válvulas de seguridad de la olla y producir una explosión por la incapacidad de liberar presión a través de estas.

Se hace siempre lo posible para que cuando se mida la temperatura en alguna región dentro del cocedor, se haga con dos sensores para evitar la pérdida de datos por alguna falla del sistema de control.

Para la captura de datos se utilizó una computadora portátil cargada con los programas necesarios para tal fin, esta se protegió siempre de la radiación solar,

el calentamiento excesivo de esta puede provocar pérdida de datos y daños en el equipo.

La caja que contiene al sistema de control se expuso a la radiación solar para emular el uso que un usuario le dará de manera cotidiana. En esta es importante observar su calentamiento para probar si los dispositivos que se le adaptaron para dispar calor son adecuados.

Para la alimentación de corriente eléctrica se usaron las tomas de la plataforma solar monofásicas de 127 V. Con esta se alimentaba en paralelo la computadora con la que se capturaban los datos, el controlador y el circuito de la resistencia eléctrica eléctrico.

El correcto funcionamiento de los sensores de temperatura se monitoreaba frecuentemente con un calibrador de temperatura Jofra D55SE de la marca Ametek.

## 4.3 Instrumentación para la etapa experimental

Las variables medidas durante las corridas experimentales son: la radiación global,  $I_g$ , la radiación directa,  $I_b$ , la humedad relativa,  $RH$ , la temperatura ambiente,  $T_a$ , la temperatura del cocedor,  $T_c$ , y el tiempo  $t$ . A continuación se especifica con que se mide cada una de estas variables.

Los datos de radiación global,  $I_g$ , se toman de la Estación Solarimétrica y Climatológica del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, esta cuenta con un piranómetro PSP de la marca Eppley para la determinación de esta variable. La estación reporta la intensidad de radiación global cada minuto en  $W/m^2$ . Su geoposición es: latitud  $18^\circ 50.63'$  Norte, longitud  $99^\circ 14.07'$  Oeste. El valor de esta variable es reportado cada minuto por la estación.

Los valores de la radiación solar directa,  $I_b$ , se toman de la estación solarimétrica del IER, esta lo hace mediante un pirheliómetro de incidencia normal EPPLEY. La estación reporta una medición de intensidad de radiación directa cada

minuto en  $W/m^2$ . Su geoposición es: latitud  $18^\circ 50.63'$  Norte, longitud  $99^\circ 14.07'$  Oeste. La estación registra y guarda el valor de esta variable cada minuto.

La temperatura del cocedor,  $T_c$ , y todas la temperaturas que se miden dentro del cocedor, se evalúan con sensores de temperatura tipo termiododo, modelo LM135 de la marca National Semiconductor. Dentro del cocedor se alcanzan temperaturas que pueden ser demasiado altas para el sensor, que tiene un rango de operación de  $-50^\circ\text{C}$  a  $150^\circ\text{C}$ , así que para protegerlo, se uso cinta de silicón que soporta temperaturas de hasta  $250^\circ\text{C}$ .

Hacer mediciones dentro de la olla implicó sumergir los sensores en agua, y para esto fue necesario habilitarlos con silicón y resina epóxica, ambas para altas temperaturas, que evitan el contacto entre las partes electrónicas del sensor y el agua, cuidando siempre que la superficie con la que mide el sensor estuviera completamente libre de silicón y pasta. La resina epóxica también tiene alta conductividad térmica, por lo que es adecuada para habilitar sensores de temperatura con un mínimo de perturbación en la medición.

Para introducir los sensores dentro de la olla, se removió una de las válvulas de seguridad y se adaptó un tapón de hule para mantener el sello hermético y la presión de la misma. Esto no es tan eficiente, pero no afecta demasiado ya que, aunque el sello no es perfecto, la temperatura de saturación en el interior de la olla, además de no decaer tanto, aun es superior a la temperatura de cocción.

Para introducir el cableado necesario al cocedor se hizo un agujero en un costado de la carcasa y se cubrieron sus orillas con cinta para evitar que dañara los cables. Además se tapó con hule aislante para evitar la entrada y salida de aire por dicho agujero.

La temperatura ambiente,  $T_a$ , y la humedad relativa,  $RH$ , se miden en la estación solarimétrica y climatológica del IER con un sensor CS500 de la empresa Campbell Scientific. Los valores de estas variables se reportan cada 10 min.

Hasta ahora, los cocedores solares que existen, suponen que el aire contenido en la cámara de cocción y sus superficies se encuentran a la misma

temperatura, así que se mide la temperatura del aire en cualquier región solo cuando que no esté expuesta a la radiación solar. Por otro lado, cuando se hace medición de temperatura en edificaciones y el sensor queda en una zona con incidencia de radiación solar, este se protege con un cono de papel aluminio o algún otro material reflejante.

Para eliminar la sospecha del efecto que tiene la radiación que llegara a incidir sobre los sensores y qué tanto puede protegerlo el cono de material reflejante, en este proyecto se hizo una prueba en la que se usaron 8 sensores para determinar la manera más adecuada de colocarlos. Esta se llevó a cabo dentro del cocedor solar sin los espejos. Se sombreó la mitad del cocedor solar y se mantuvo la otra expuesta a la radiación solar. En la zona sombreada se pusieron dos sensores con conos de papel aluminio y dos sin conos. Lo mismo se hizo en la región con incidencia de radiación solar con una diferencia, de los sensores que no tenían cono, uno se puso de frente al Sol y el otro en la dirección contraria. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.1, se hizo una medición por segundo pero en el gráfico se muestra un promedio de cada 10 segundos.

Se considera a la medición hecha en la sombra sin cono como la verdadera, es decir, se considera la muestra en blanco por no contar con las perturbaciones que se están analizando.

En la Figura 4.1 se puede observar como cada caso es diferente. Es muy claro como los sensores que están expuestos a la radiación solar son afectados por esta, incluso cuando cuentan con los conos de material reflejante. De los que no están protegidos con dichos conos, el hecho de haberlos orientados o no en dirección de la radiación solar afecta de manera importante, marcando diferencias de hasta 11 °C. Por otro lado en los sensores ubicados en la región sombreada se puede observar una diferencia entre los que tiene cono y los que no, esto se debe a que esta protección crea una región en la que ocurre un estancamiento de aire, la cual tiene su propia temperatura diferente a la del demás aire contenido en el cocedor solar.

Con esta prueba se puede concluir que los sensores, usados para medir temperaturas dentro del cocedor, no pueden estar expuestos a la radiación solar ni en contacto con ninguna superficie debido a que cualquier sombreadamiento,

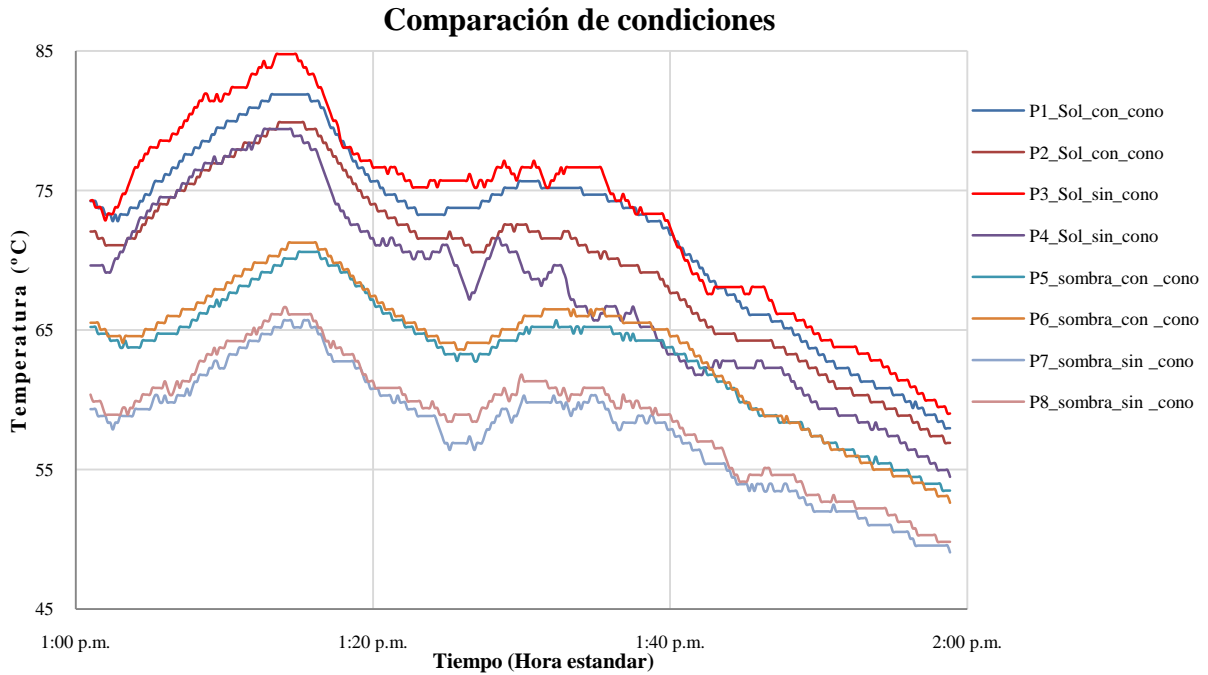


Figura 4.1: Comparación de las diferentes condiciones bajo las que se pueden habilitar los sensores.

planeado o no, provocará errores en la medición. Así pues, se opta por colocar los sensores por debajo de la base metálica y sin estar en contacto con ninguna superficie.

Ahora que se tiene todo para hacer las evaluaciones teórica y experimental, en el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos en ambas y se hace un análisis de los mismos.





## 5. Resultados y discusión del comportamiento del cocedor solar

En la etapa experimental se realizaron varias pruebas en el periodo comprendido entre diciembre de 2012 y abril de 2013. En este capítulo se presentan las más significativas, es decir, las que se usaron para tomar decisiones, determinar los parámetros del cocedor y hacer la simulación con el modelo termodinámico propuesto.

Para realizar los experimentos se construyeron dos cocedores solares, uno tal y como se describe en el capítulo 2 y el otro con una doble capa de plástico transparente de altas temperaturas en la cúpula con 3 cm de separación entre ellas. Para identificarlos a lo largo de este trabajo se denomina como Cocedor 1 al primero y Cocedor 2 al segundo.

El Cocedor 2 se construyó con la intención de mejorar el sello de la cúpula con la carcasa y de agregar una capa más de aire estático que evitara principalmente las pérdidas por convección.

El 4 de marzo de 2013 se hizo una prueba con el objetivo de comparar el funcionamiento de los dos cocedores.

Se colocaron los dos cocedores en forma equivalente y se midió su temperatura en el interior de las ollas, sin espejos y sin respaldo eléctrico. Como se dijo en el capítulo anterior, se usaron 4 litros de agua y sensores de temperatura protegidos con silicón y pasta expóxica para altas temperaturas.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.1. En esta se presentan también la temperatura predicha por el modelo termodinámico, la temperatura ambiente y la radiación global que incidió a lo largo de la prueba.

Como se puede ver en la Figura 5.1, las diferencias entre las temperaturas de los cocedor 1 y 2 son muy pequeñas, la máxima es de 1.5 °C. Apoyados en esto se pueden usar ambos cocedores para hacer pruebas en un mismo día haciendo

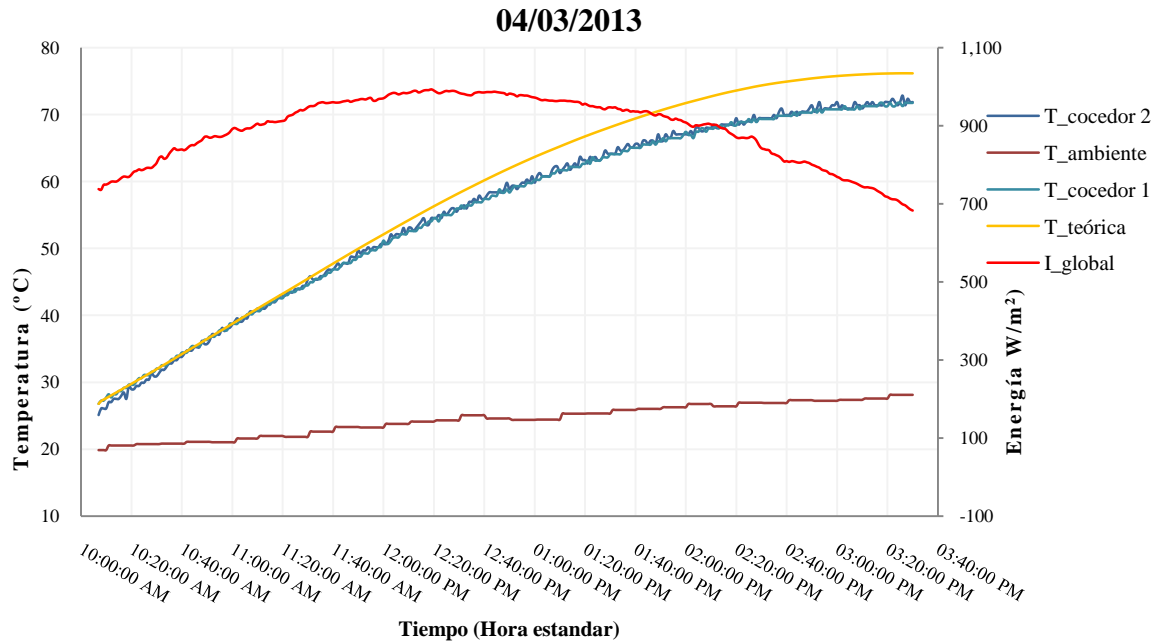


Figura 5.1: Evolución de la temperatura en los cocedores uno y dos el día 4 de marzo de 2013.

variaciones entre un cocedor y otro, sabiendo que la presencia de la cúpula de dos capas no afecta de manera significativa.

En cuanto al modelo, se puede apreciar que hace una buena predicción. Tomando el valor experimental como referencia, se calculó que en el punto en que difieren más la diferencia es de 8.3 % y haciendo un promedio a lo largo de toda la prueba, es de 4.36 %. Esta diferencia se puede deber a varios factores, tanto del dispositivo como del modelo; por ejemplo, el sello no es perfecto y permite que haya intercambio de aire entre el exterior y el interior del cocedor. Por otro lado, las suposiciones hechas en el planteamiento y solución, además de variables no contempladas como la velocidad del viento, son en parte causantes de la existencia de esta diferencia.

Como se puede ver en la Figura 5.1, se tomó un día claro con buena radiación solar. Usando este dato, la temperatura del cocedor y el modelo termodinámico se calculó la energía disponible,  $E_d$ , la energía útil,  $E_u$ , y la eficiencia del cocedor a lo largo de la prueba,  $\eta_c$ . Se tomaron la temperatura del cocedor, que fue la medida durante la prueba y que por su similitud no importa de

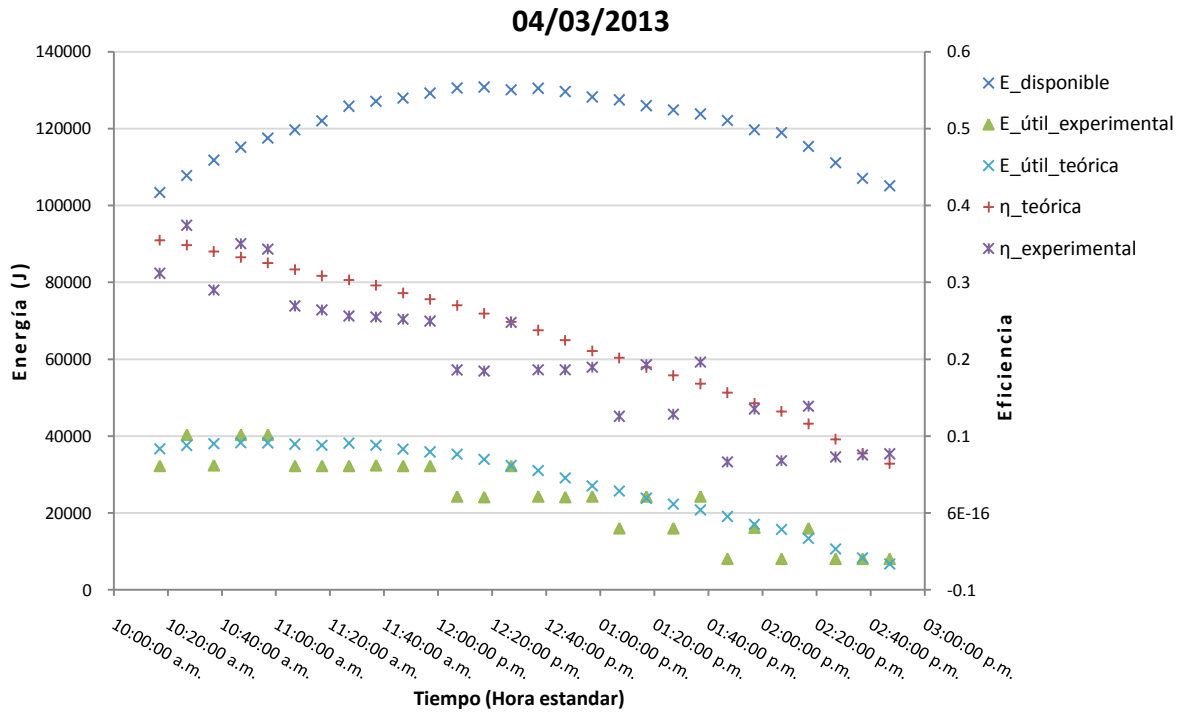


Figura 5.2: Energía y eficiencias durante el proceso de cocción del día 4 de marzo de 2013.

qué cocedor sea, y la teórica, obtenida por el modelo termodinámico propuesto. Estas se presentan en la Figura 5.2 en intervalos de 10 min.

En la Figura 5.2 se puede observar como la energía útil calculada se asemeja a la obtenida experimentalmente, se puede ver como siguen la tendencia de ir decreciendo conforme avanza la prueba, lo mismo ocurre con las eficiencias. El decremento en ambas se debe al aumento de la diferencia que hay entre la temperatura del cocedor y la temperatura ambiente,  $\Delta T$ . Esto propicia la disipación de energía en forma de calor hacia el ambiente.

Con el valor de la energía útil y el intervalo de tiempo se obtiene la potencia de cocción experimental y teórica, esta, al ser directamente proporcional a la energía útil, presenta el mismo comportamiento de disminuir al aumentar la diferencia de temperatura entre el cocedor y el medio ambiente. Hay que recordar que es este comportamiento es el que define el desempeño del cocedor.

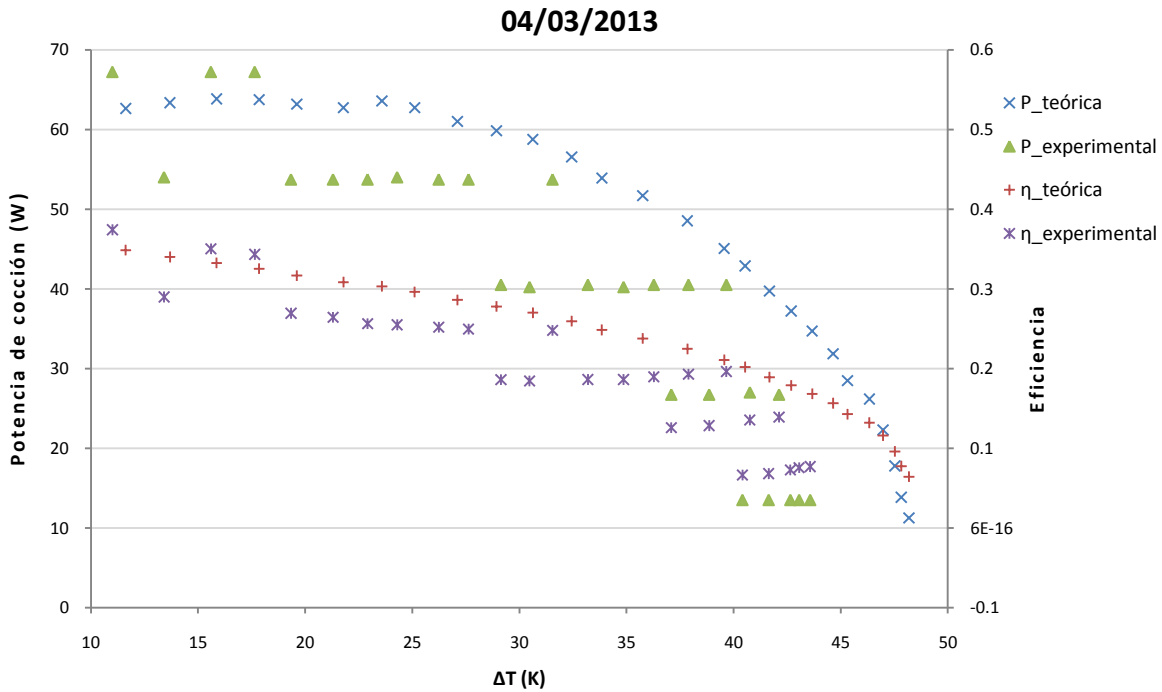


Figura 5.3: Potencia de cocción y eficiencia del cocedor para el 4 de marzo de 2013.

En la Figura 5.3 se presenta la potencia de cocción contra la diferencia de temperaturas entre el cocedor y el ambiente. También se presenta la eficiencia.

Con la Figura 5.3 queda más claro el comportamiento de la potencia de cocción y la eficiencia con respecto a  $\Delta T$ , pero llama mucho la atención como la potencia de cocción obtenida experimentalmente pareciera repetir valores muy definidos y en lugar de verse una curva, como en el caso de la teórica, se ve más como si tuviera escalones. Se ha investigado y el causante de este problema es el sistema de adquisición usado, el convertidor analógico digital (ADC) con que este cuenta no tiene la resolución suficiente para detectar cambios de temperatura menores a  $0.49^{\circ}\text{C}$ , es por eso que se visualizan dichos escalones. La baja resolución del ADC usado afecta el cálculo de la temperatura y potencia de cocción máximas del cocedor con los datos experimentales.

Para hacer la regresión lineal con la que se calculan los parámetros representativos del cocedor se recurre a las figuras mostradas hasta ahora para la prueba del día 4 de marzo de 2013. En ellas se puede observar que todas las condiciones establecidas en el capítulo 3 se cumplen a lo largo de la prueba desde

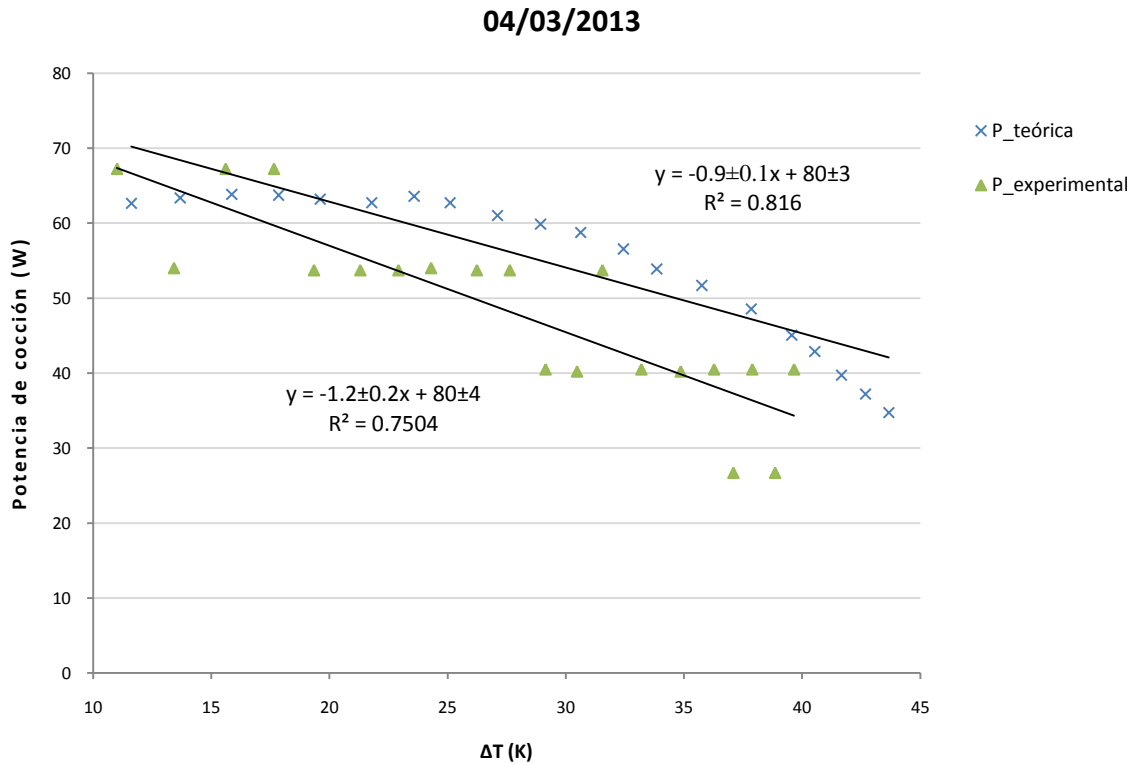


Figura 5.4: Regresión lineal de la potencia de cocción contra la diferencia de temperaturas entre el cocedor y el medio ambiente del 4 de marzo de 2013.

las 10:00 hora solar, hasta las 14:00 hora solar, es decir, de las 9:36 a las 13:36 hora oficial. Así pues a los datos comprendidos en ese tiempo de la prueba se les hace una regresión lineal para obtener la ecuación con la que se calcula  $T_{c,max}$  y  $P_{c,max}$  Figura 5.4.

La regresión lineal obtenida de los datos reales tiene un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.7504, que es apenas mayor a los 0.75 que aconseja la literatura. Su valor tan bajo se puede adjudicar, como ya se comentó, a la baja sensibilidad del sistema de adquisición y a que no se está considerando algunas variables como la velocidad del viento.

Desde este punto se hace la observación de hacer el sistema de adquisición más sensible, ya sea con un ADC de mayor resolución o con un amplificador operacional para la señal analógica. Esto haría más variados los valores de potencia

de cocción posibles, y de esa manera, los cambios en la potencia de cocción serían más suaves.

En la regresión lineal hecha a los datos teóricos se obtuvo una potencia máxima de cocción,  $P_{c,max}$ , de  $80 \pm 3$  W, mientras que la experimental dio de  $80 \pm 4$  W. Se puede ver como estas potencias son prácticamente iguales.

Por otro lado, aunque las pendientes de las regresiones hechas no son iguales, se parecen bastante e incluso se traslapan.

Para la temperatura máxima,  $T_{c,max}$ , se obtienen dos relaciones, ecuaciones 5.1 y 5.2,

$$T_{c,max,teórica} = 88.9 \pm 0.1 + T_a, \tag{5.1}$$

$$T_{c,max,experimental} = 66.7 \pm 0.2 + T_a. \tag{5.2}$$

El promedio de la temperatura ambiente entre la 10:07 am y las 1:36 pm fue de  $23.01$  °C, o sea que según las regresiones obtenidas  $T_{c,max,teórica} = 111.9 \pm 0.1$  °C y  $T_{c,max,experimental} = 89.7 \pm 0.2$  °C.

Aunque la temperatura máxima experimental apenas sobrepasa los  $90$  °C que requiere la cocción, hay que recordar que hasta ahora no se han implementado el sistema de concentración solar ni el de respaldo eléctrico. Por otro lado, no se ha usado ningún aislante. El uso de algún método o material para evitar la pérdida de energía incrementaría de manera importante la eficiencia del dispositivo, así como la potencia y temperatura máximas del cocedor.

Con las regresiones obtenidas se calcula la medida de desempeño única,  $P_u$ , dándole a  $\Delta T$  un valor de  $50$  °C. Con la relación teórica se obtiene un valor de  $35 \pm 6$  W y con la experimental  $20 \pm 10$  W, al igual que la pendiente y la ordenada al origen de dichas regresiones, estos valores se traslapan.

El 15 de abril se hizo otra prueba en la que se usaron los dos cocedores solares. A uno de ellos, el cocedor 2, se le quitó la base metálica y al otro no,

cocedor 1. A los dos se les colocaron los dos espejos del concentrador solar y 4 litros de agua en sus ollas. Ninguno contó con sistema de respaldo eléctrico.

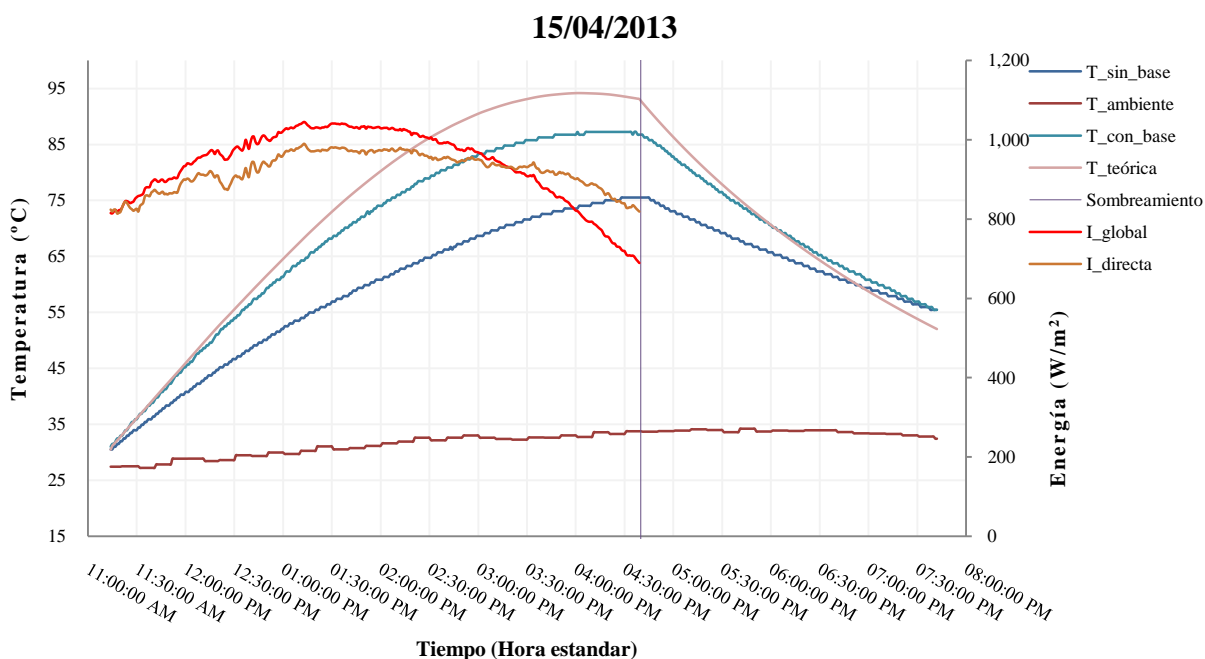


Figura 5.5: Evolución de la temperatura durante la prueba del día 15 de abril de 2013.

El objetivo de la prueba del 15 de abril fue observar el impacto que tiene la presencia de la base metálica en el funcionamiento del cocedor, que es la principal innovación de este proyecto.

Es importante tener en cuenta que para esta fecha ya se estaba en horario de verano, este dato es necesario ya que la estación climatológica y solarimétrica del IER no lo contempla para el registro del tiempo.

En un momento de la prueba, a las 4:40 pm, se sombreó el cocedor solar para observar cómo se enfriaba.

En la Figura 5.5 se muestran las temperaturas dentro de las ollas de los cocedores, la radiación global, la directa y la temperatura estimada con el modelo termodinámico propuesto para la prueba.

La temperatura predicha por el modelo termodinámico presentado en el capítulo 3 se aproxima bastante a la medida durante la prueba en el cocedor 1. En



el punto con mayor diferencia es de 9.30 %, mientras que sacando un promedio a lo largo de toda la prueba da de 6.08 %, esto con respecto a la temperatura medida experimentalmente. Observando la discrepancia en esta prueba se puede identificar otro aspecto responsable del mismo. Si se presta atención al comportamiento de la temperatura calculada por el modelo, se puede ver que durante el calentamiento su evolución excede a la experimental, mientras que durante el enfriamiento se queda corta, esto demuestra que hace falta una resistencia al transporte de energía en forma de calor hacia y desde el cocedor solar. El modelo no la tiene contemplada por la suposición de que la superficie de la base de metal, la olla y el contenido de esta última están a la misma temperatura. Es decir, se está haciendo la consideración que toda la energía absorbida por estas superficies llega íntegra al interior de la olla, y por otro lado durante el enfriamiento, que la energía del contenido de la olla se pierde de la misma manera a través de esas superficies.

También se pudo observar como la temperatura en el cocedor 1 disminuye más rápidamente que la del cocedor 2 durante el enfriamiento, esto quiere decir que la base metálica está funcionando como una aleta que, a la vez que aumenta el área de captación, aumenta el área de contacto para el flujo de energía en forma de calor.

Con la energía disponible y la evolución de la temperatura se hace el cálculo de la energía útil,  $E_u$ , y de esa manera el de la eficiencia del cocedor,  $\eta_c$ , el cálculo se hace para los dos cocedores y para los datos teóricos en intervalos de 10 minutos. Estos se presentan en la Figura 5.6, se puede observar que, en comparación de la prueba del 4 de marzo, la eficiencia disminuye. Esto se debe a que la energía disponible ha aumentado considerablemente por la presencia del sistema de concentración solar. Pareciera que la eficiencia del cocedor 2 es mayor que la del cocedor 1 al final de la prueba pero, lo que en realidad sucede, es que el cocedor 2 aún puede seguir calentándose más rápidamente porque su temperatura es aún muy inferior a la ambiente. Para comprender esto mejor y observar realmente la tendencia de esta, es necesario graficarla con respecto a la diferencia de temperaturas entre el cocedor y el ambiente,  $\Delta T$ , como se muestra en la Figura 5.7.

Ahora bien, con la energía útil calculada y los intervalos de tiempo se estima la potencia de cocción y se presenta su dispersión contra la diferencia de temperatura del cocedor con el ambiente,  $\Delta T$ , Figura 5.7.

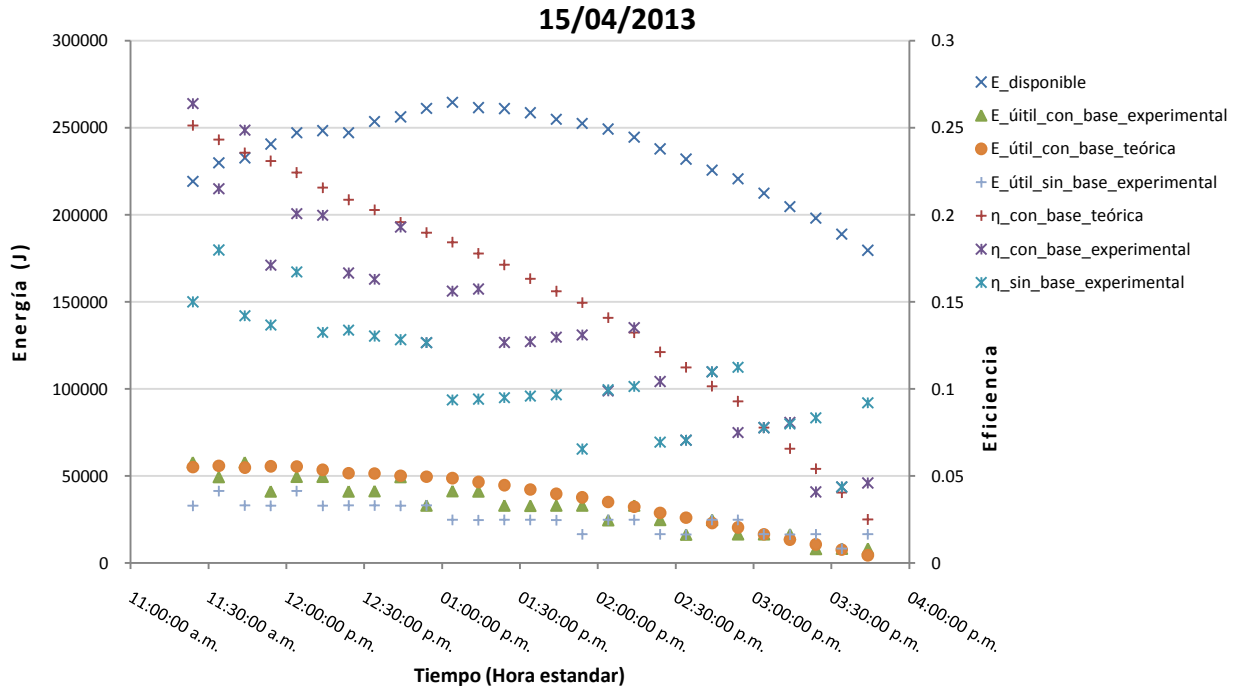


Figura 5.6: Energía útil y eficiencia de los cocedores en la prueba del día 15 de abril de 2013.

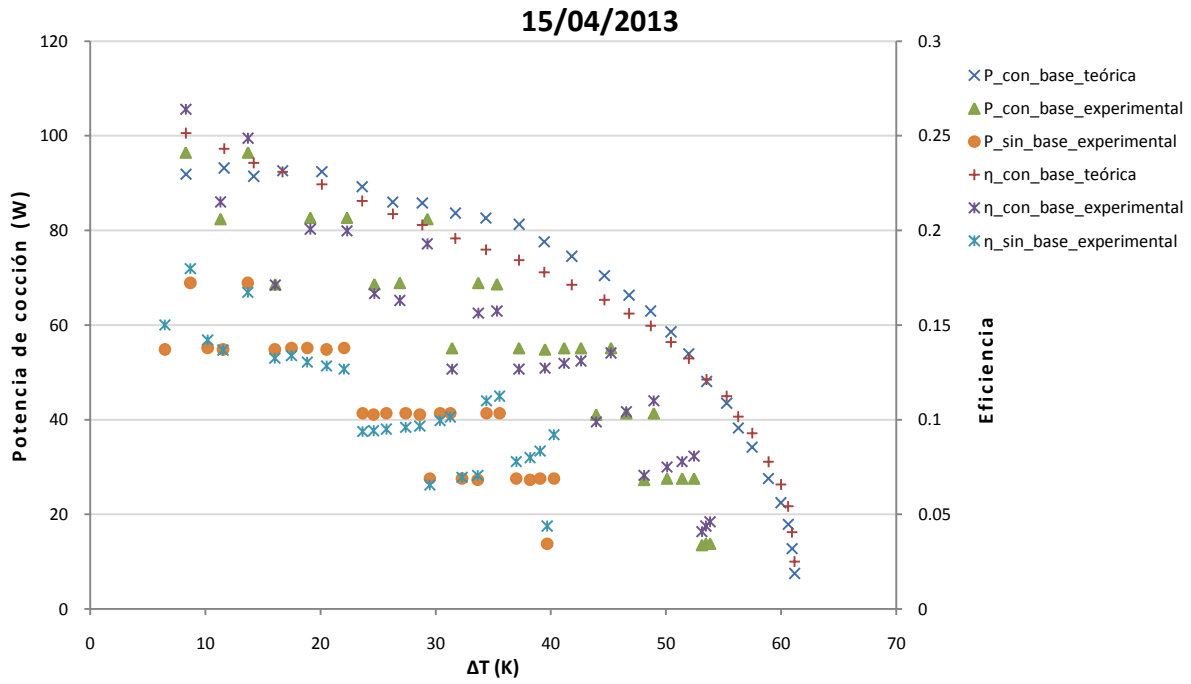


Figura 5.7: Potencias de cocción y eficiencias para los cocedores de la prueba del día 15 de abril de 2013.

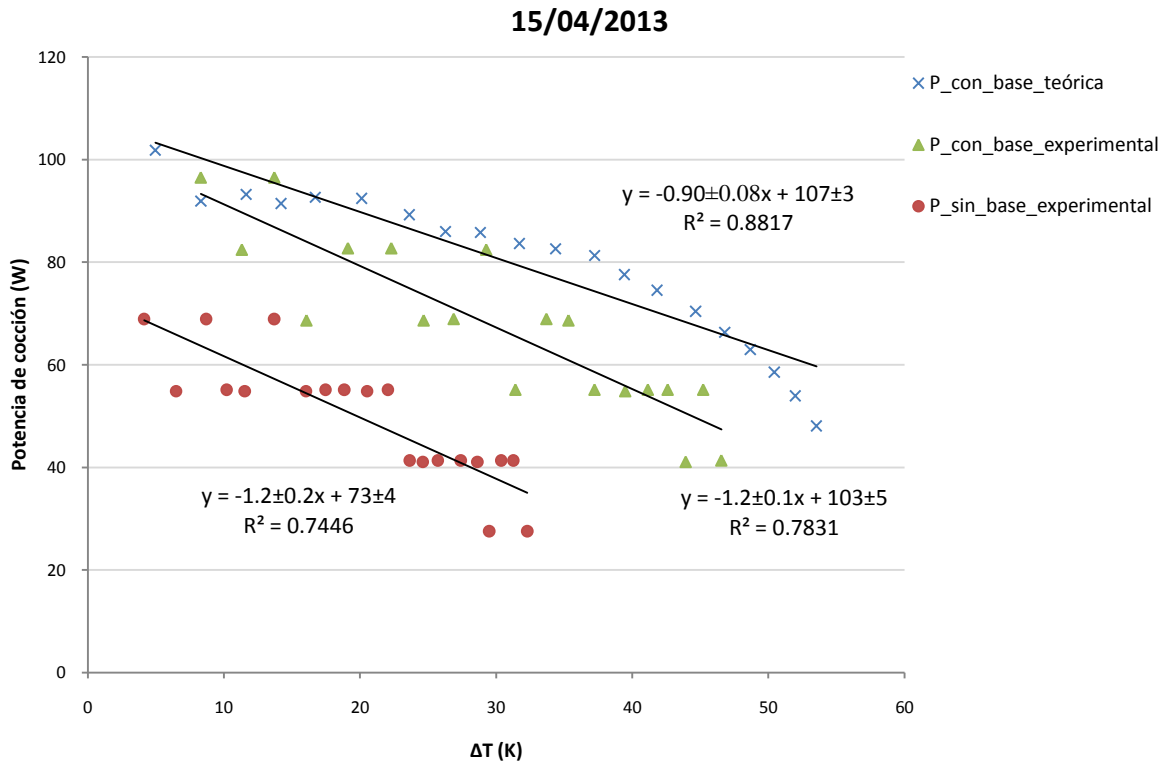


Figura 5.8: Regresión lineal para las potencias de cocción de los cocedores en la prueba del 15 de abril de 2013.

En la Figura 5.7 se puede observar como la eficiencia al igual que la potencia de cocción decrecen al aumentar  $\Delta T$ .

Para obtener los parámetros del cocedor solar se observa en las gráficas presentadas para la prueba del día 15 de abril de 2013, que las condiciones propuestas en el capítulo 3 se cumplen de las 10:00 a 14:00 horas solar, es decir de las 10:24 am a las 2:24 pm. De esta manera se obtiene la Figura 5.8, en ella se pueden observar las regresiones lineales hechas para la potencia de cocción de los cocedores.

Al igual que la prueba del 4 de marzo de 2013, los coeficientes de correlación  $R^2$  son bajos, incluso el del cocedor sin base metálica no supera los 0.75 recomendados por la literatura.

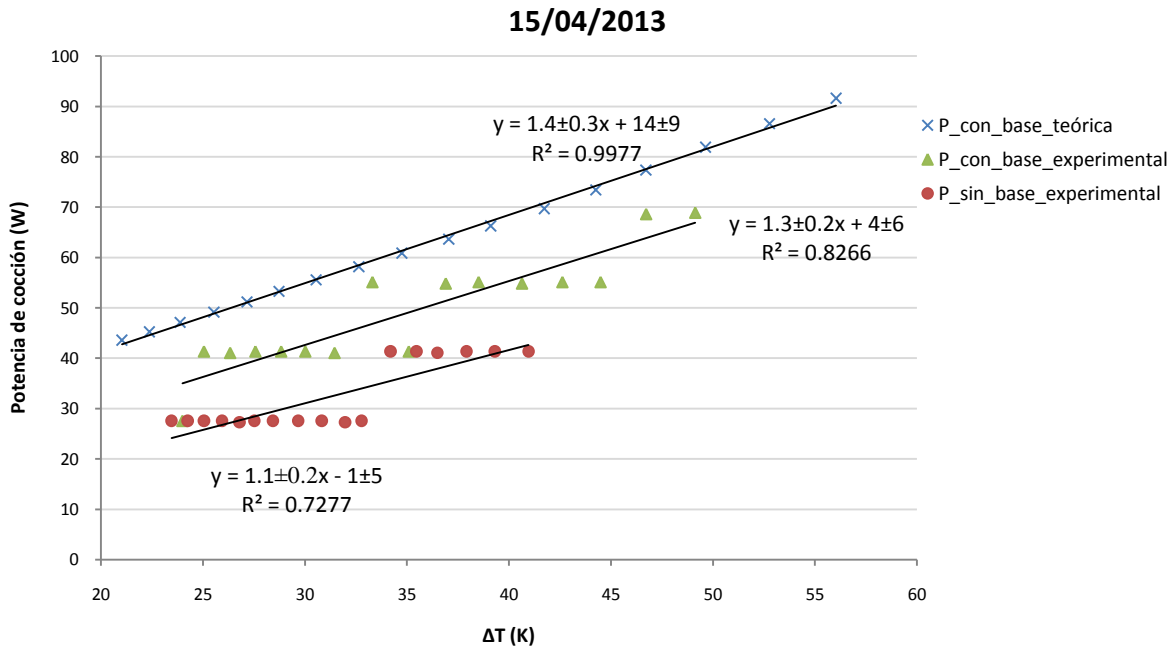


Figura 5.9: Regresión lineal para la determinación del coeficiente de de enfriamiento de los cocedores del a prueba del 15 de abril de 2013.

Con estas regresiones se determina que la potencia máxima teórica es de  $107 \pm 3$  W, la del cocedor con base metálica de  $103 \pm 5$  W y la del cocedor sin base, de  $73 \pm 4$  W.

De la misma manera y considerando que la temperatura promedio fue de  $29.59$  °C, entre las 11:14 am a las 2:24 pm, se obtienen las temperaturas máximas en los tres casos: para el teórico fue de  $148.5 \pm 0.1$  °C,  $115.4 \pm 0.1$  °C para el cocedor con base metálica y  $90.4 \pm 0.2$  °C para el que no tenía.

Finalmente la medida única de desempeño del cocedor solar,  $P_u$ , se calcula y se determina que es de  $62 \pm 5$  W para los datos teóricos,  $43 \pm 7$  W para el cocedor con base metálica y  $13 \pm 10$  W para el cocedor que no contaba con esta.

La parte de la prueba en que se sombreó el cocedor se usa para determinar su coeficiente de enfriamiento, CR, para esto se hace la dispersión de la energía que sale,  $\dot{E}_{sale}$ , contra la diferencia de la temperatura entre el cocedor y el ambiente,  $\Delta T$ . Esta se muestra en la Figura 5.9, en ella se puede observar como el valor para CR obtenido de los datos teóricos es de  $1.4 \pm 0.3$  W/K, para el cocedor con base metálica  $1.3 \pm 0.2$  W/K y para el que no tiene la base  $1.1 \pm 0.2$  W/K.

Parámetro	Cocedor con base metálica y espejos	Cocedor con base metálica y sin espejos	Cocedor con espejos y sin base metálica
$P_{c,máxima}$ (W)	103±5	80±4	73±4
$T_{c,maxima}$ (°C)	115.4±0.1	89.7±0.2	90.4±0.2
$P_u$ (W)	43±7	20±10	10±10
$CR$ (W/K)	1.3±0.2	-	1.1±0.2

Tabla 5.1: Parámetros de las diferentes configuraciones probadas el 4 de marzo y el 15 de abril de 2013

Como se había señalado anteriormente el cocedor que cuenta con la base metálica se enfría más rápido que el que no tiene, con los valores de  $CR$  determinados en la regresión esto queda corroborado.

Lo valores reportados en la literatura para diferentes cocedores solares y sus configuraciones van desde 75 W hasta 190 W para la potencia de cocción y de 14 W a 115 W para la medida única de desempeño de diferentes cocedores solares. De esta manera se corrobora que los valores obtenidos hasta ahora caen dentro de lo común para estas tecnologías. Para facilitar la observación y análisis de los mismos, se presentan en la Tabla 5.1.

El caso del cocedor con espejos y sin base metálica se puede considerar el caso de un cocedor abierto común, compararlo con cualquiera de los cocedores con base metálica hace evidente como el uso de esta mejora el desempeño del cocedor solar.

Además de hacer la caracterización del cocedor, se lograron hacer varias observaciones a lo largo de estas corridas experimentales, importantes para el uso del cocedor solar, la cuales se presentan a continuación.

Aunque el cocedor solar alcanza condiciones de temperatura y presión que pueden llegar a ser peligrosas, su manejo no requiere más cuidados que el de una olla de presión que se pone en una estufa de gas. Los guantes para sujetar objetos calientes que se encuentran en cualquier cocina, son suficientes para su manipulación.

Los materiales usados para la construcción del cocedor son difíciles de oxidar. Esto facilita su limpieza, la hace tan sencilla que no requiere de algún trato diferente al de cualquier electrodoméstico.

El plástico de la cúpula resiste muy bien las condiciones de la intemperie como corrientes de aire, polvo, hojas de árboles, insectos, etc. A lo largo de las pruebas fue necesario cambiarlo solo una vez, es decir se puede cambiar cada dos meses sin que afecte el funcionamiento del cocedor solar.

La manipulación y mantenimiento del sistema de concentración también resultó ser muy sencilla, se puede operar por una sola persona y la intervención humana requerida es mínima, con esta etapa teórica se pudo observar que un ajuste semanal es suficiente para que cumpla correctamente su función.

Luego de que se obtuvieron los parámetros característicos del cocedor, se prosiguió a realizar pruebas para observar el funcionamiento del sistema de respaldo eléctrico.

En estas pruebas se programaba un tiempo de retraso para el sistema de respaldo eléctrico, de esta manera se daba oportunidad para que fuera solo la energía solar la que calentara el cocedor. También se programaba la temperatura de cocción a la cual se le dio un valor de 90 °C.

Estas pruebas se corrieron usando el sistema de concentración solar y, al igual que en las presentadas anteriormente en este trabajo, se utilizó agua y no alimentos en el interior de las ollas.

Las primeras pruebas que se hicieron tenían como objetivo comprobar que el sistema de control funcionara. El 3 de abril de 2013 se realizó una prueba en la que se colocó el sensor de temperatura del sistema de control dentro de la olla del cocedor solar. De esta manera se obtuvo el comportamiento ideal del sistema de control, esto debido a que la variable de entrada, para determinar si se enciende o no la resistencia eléctrica, se mide de manera directa en el interior de la olla que contiene los alimentos.

Para el diseño final del cocedor solar, medir la temperatura dentro de la olla no será posible por las razones ya expuestas en el capítulo 4. Con el fin de

localizar una región en la cual se pueda fijar el sensor de temperatura del sistema de respaldo eléctrico, se colocaron 6 sensores bajo la base metálica a 8, 12 y 18 cm de la resistencia, como se muestra en la Figura 5.10. La denominación que se les da a los sensores, y que será usada a lo largo de estas pruebas, es una P seguida por la distancia a la que se encuentra de la resistencia eléctrica y la posición con respecto a esta. Hay que recordar que el cocedor se orienta con los espejos de frente al sur geográfico de la Tierra, así que si el sensor está hacia el sur de la resistencia se identifica con una S, y con una N si esta hacia el norte de este.

Los datos obtenidos en esta prueba, junto con la radiación solar global, directa y la temperatura ambiente se presentan en la Figura 5.11. En esta se observan varios aspectos importantes.

La resistencia eléctrica tarda un poco en alcanzar su potencia nominal, eso junto a la resistencia que presenta la base metálica y la olla provocan el ligero retraso que se puede observar en la respuesta de la temperatura del interior de la olla. Cuando alcanza su potencia de trabajo, la resistencia alcanza temperaturas tan altas que hace que se ponga al rojo vivo, este calor acumulado por el material del dispositivo hace que la temperatura del interior de la olla siga aumentando incluso luego de haberse apagado.

Durante la prueba la temperatura de la olla alcanzó la de saturación del agua, se observó incluso la presencia de vapor. Esto ocurrió a los 97 °C, la cual es una temperatura baja para una olla de presión, así queda evidenciado que el tapón usado para introducir los sensores a la olla rompe el sello de la misma y evita que la alta presurización ocurra. De cualquier manera esto no afecta las pruebas ya que aun se encuentra alejado de los 90 °C, que se han venido estableciendo como temperatura de cocción.

También se puede observar que fue un día con buena radiación solar, pero el haber alcanzado la temperatura de saturación habla de energía acumulada por el cambio de fase, así pues, surge la duda de si la estabilidad que presenta el cocedor luego de apagarse el sistema de respaldo, se debe a esta energía acumulada o al aporte de la radiación solar. Esto se aclaró con un prueba realizada el 5 de abril del 2013, que se presentará más adelante, en la que se la presencia de nubes afectó considerablemente la radiación solar incidente.



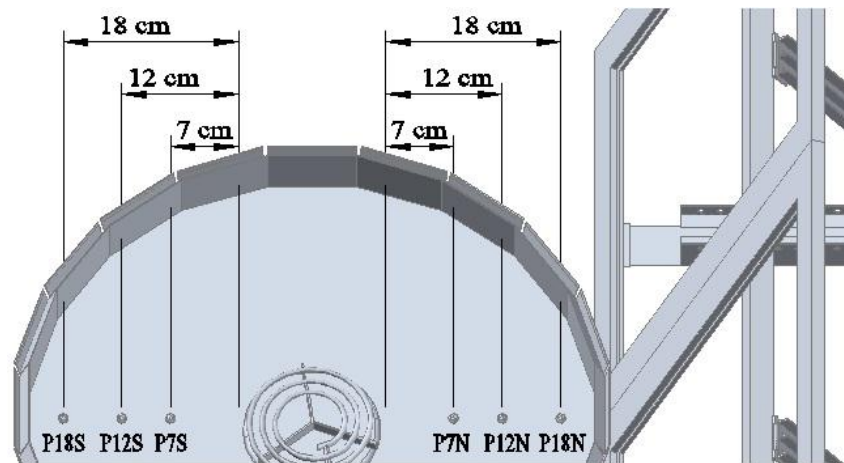


Figura 5.10: Disposición de los sensores bajo la base metálica en la prueba del 3 de abril de 2013.

El respaldo eléctrico se encendió a las 12:38 pm, cuando la temperatura en el interior de la olla era de 73.83 °C, y se apagó a las 12:56 pm, o sea que la resistencia eléctrica duró encendido solo 18 minutos. La potencia de este componente es de 800 W; suponiendo que no varía a lo largo de los 18 minutos, el sistema de respaldo eléctrico consumió 864,000 J, o lo que es igual, 0.24 kWh de energía eléctrica, con un costo de 0.669 \$/kWh en tarifa doméstica 1A de la CFE.

De los sensores ubicados bajo la base metálica del cocedor, se puede ver como todos los que están a 7 y 12 cm registran temperaturas muy altas, tanto que medir en esas regiones pone en peligro al sensor mismo. Con esta observación se puede descartar desde este momento esas zonas para ubicar el sensor del sistema de respaldo eléctrico.

Los sensores colocados a 18 cm de la resistencia eléctrica registraron temperaturas más moderadas, la máxima del P18S fue de 108.23 °C y la del P18N de 106.78 °C.

Algo que hay que señalar es que al momento en que en el interior de la olla se alcanzaron los 90 °C, el P18S y el P18N registraron temperaturas de 106.27 °C y 104.83 °C respectivamente.

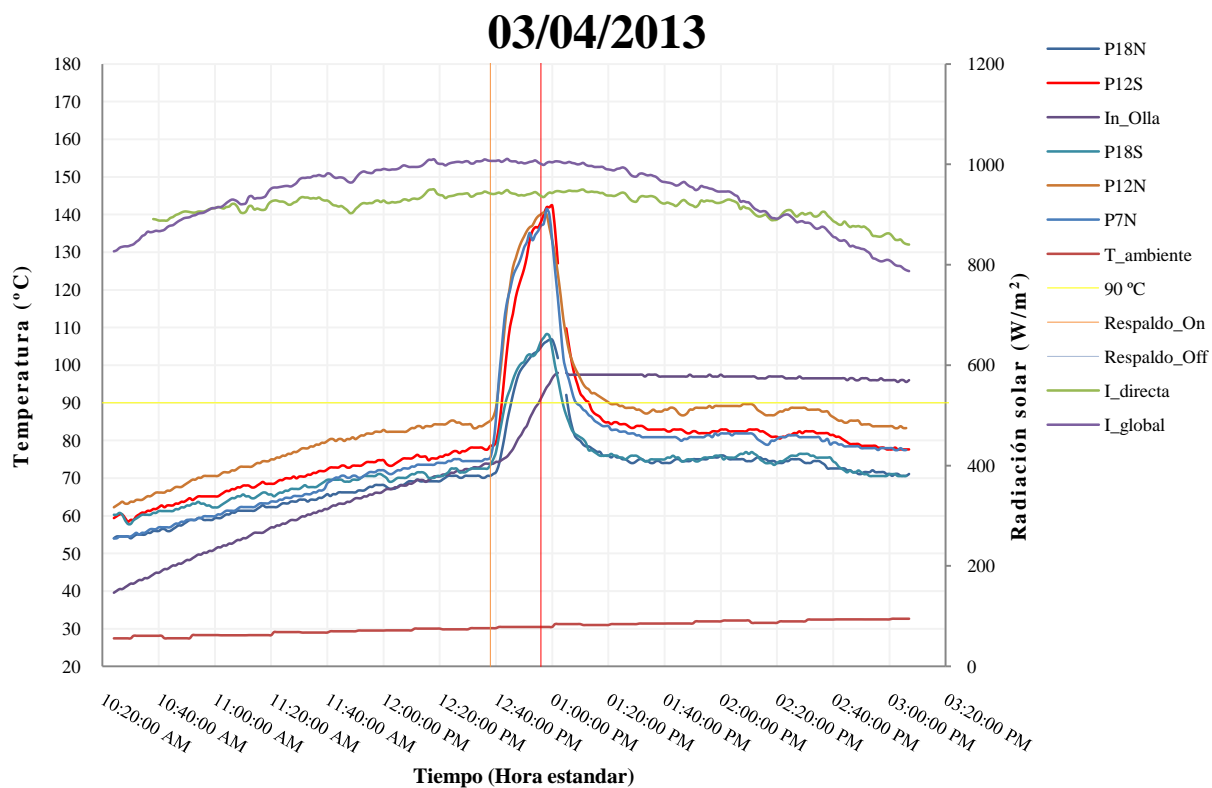


Figura 5.11: Comportamiento del cocedor solar con respaldo eléctrico para el día 3 de abril de 2013.

Con esta prueba se puede decir que el control funciona correctamente, mantuvo la temperatura del agua por encima de los 90 °C a lo largo de toda la evaluación.

La prueba se repitió el día 5 de abril de 2013. Al igual que en la del 3 de abril, el sensor del sistema de control se introdujo en la olla, y varios más bajo la base metálica del cocedor. Se usaron 4 litros de agua y el sistema de concentración solar.

Lo que hace especial a esta prueba fue la presencia de nubes durante la evaluación que afectaron de manera importante la radiación solar incidente, como se puede observar en la Figura 5.12.

La pequeña perturbación que se observa al inicio de la evaluación se debe a un problema que se tuvo con las tarjetas Arduino, este problema se resolvió y no causó mayor conflicto para el resto de la prueba.

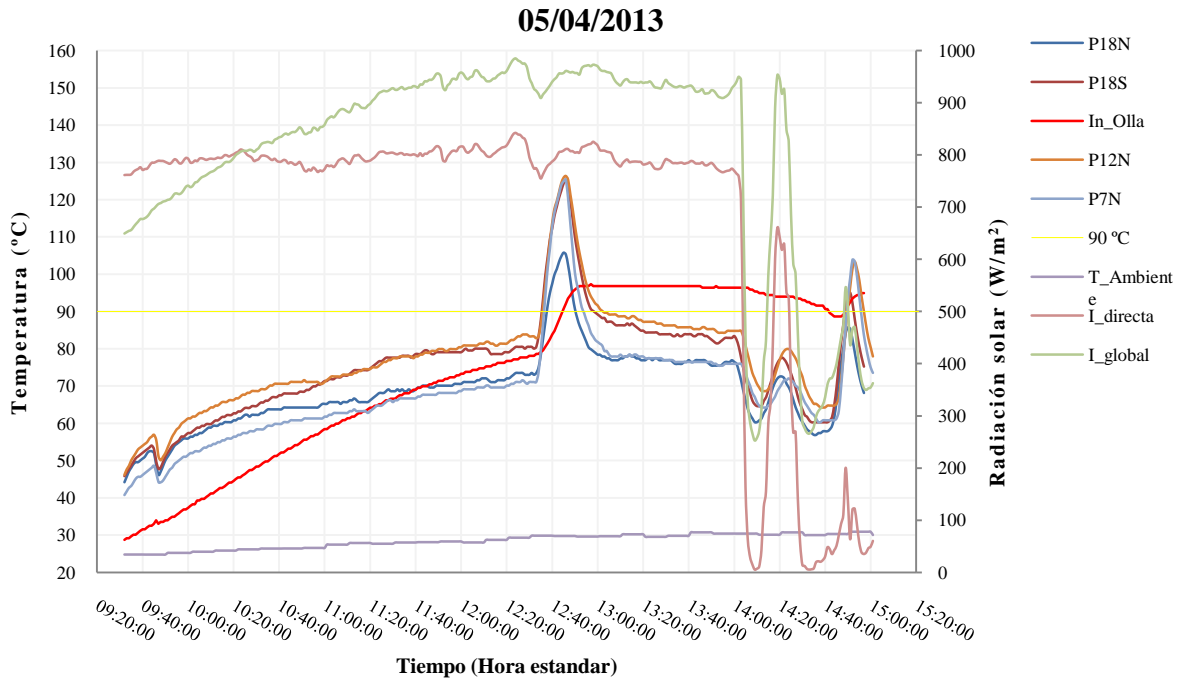


Figura 5.12: Resultados obtenidos en la prueba del día 5 de abril de 2013.

Se puede ver como a partir de las 2:05 pm la radiación solar varía por la presencia de nublados intermitentes. Esta alteración en el flujo de la energía solar hizo que el cocedor se enfriara, requiriendo que la resistencia eléctrica se encendiera nuevamente por 7 minutos de las 2:42 pm a las 2:49 pm.

Otra observación importante es que, luego de apagarse el respaldo eléctrico, las regiones en las que se encontraban midiendo el P18S y P18N se mantuvieron a una temperatura estable que rondaba los 83 °C y 76 °C, respectivamente, hasta que se nubló. Cuando el interior de la olla bajó de los 90 °C, los sensores ubicados a 18 cm de la resistencia eléctrica, registraron temperaturas de 60.76 °C y 58.37 °C, respectivamente.

Si se hubiera estado controlando con el P18S o P18N, la resistencia se hubiera encendido desde las 12:59 pm o a las 12:51 respectivamente, o sea casi dos horas antes de que fue necesario a las 2:42 pm.

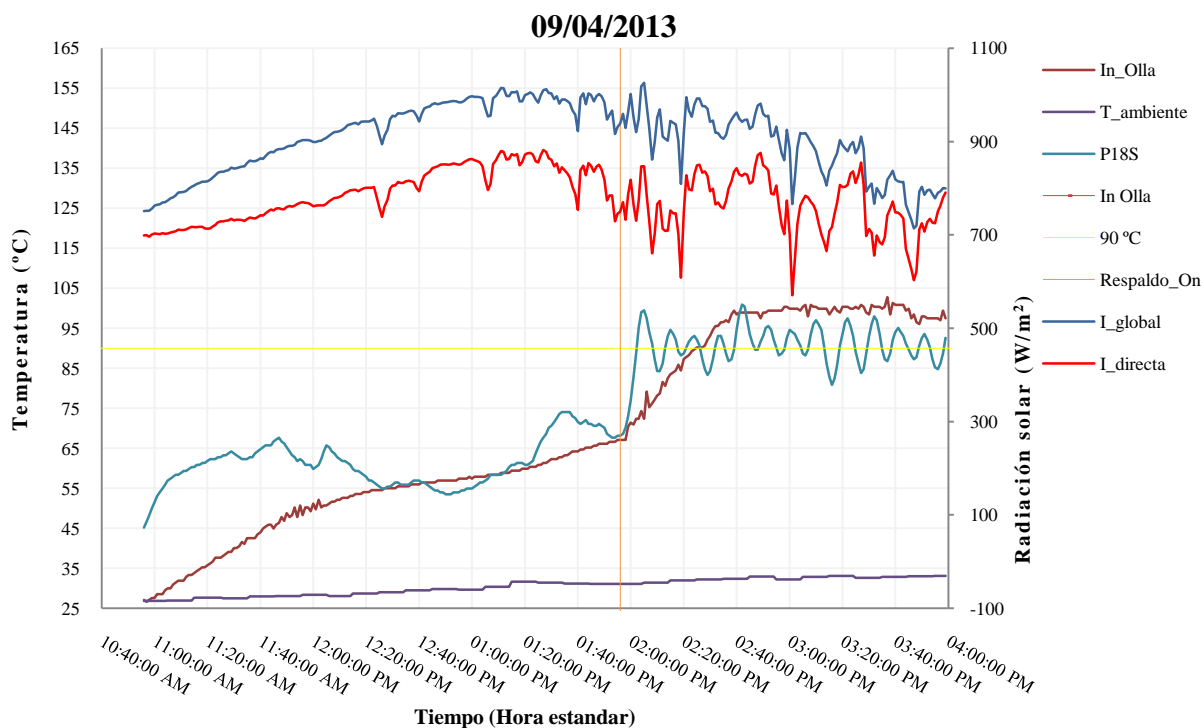


Figura 5.13: Resultados obtenidos en la prueba del 9 de abril de 2013.

La temperatura alcanzada en el interior de la olla justo antes de que se encendiera la resistencia eléctrica fue de 78.13 °C, mientras que P18N y P7N registraban 73.53 y 71.08, respectivamente. Esto demuestra que aunque el agua alcanzara la temperatura de cocción solo con energía solar, es posible que debajo de la base metálica no sea así, si el sensor del controlador se ubicara en alguna de esas zonas el La resistencia encendería sin ser necesario.

El 9 de abril del 2013 se hizo una prueba en la que el sensor del sistema de control se colocó bajo la base metálica a 18 cm y al sur de la resistencia eléctrica, es decir P18S. Se usaron 4 litros de agua y se contó con el sistema de concentración solar. Además del sensor del controlador, se colocó otro dentro de la olla, de esta manera se pudo observar que tan necesario era que se activara la resistencia eléctrica. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.13.

La prueba inició a las 10:56 am y se le dieron 3 horas de calentamiento solo con energía solar. Al final de este periodo la temperatura dentro de la olla era de 67.08 °C, y de 68.15 °C en el P18S.

En la Figura 5.13 se puede ver como se hacen presentes los defectos identificados en las pruebas anteriores para el sistema de respaldo eléctrico.

El interior de la olla alcanzó la temperatura de cocción 29 minutos después de haberse activado por primera vez el sistema de respaldo. El P18S alcanzaba los 90 °C muy rápido, haciendo que la resistencia eléctrica se apagara prematuramente.

Después, cuando el interior de la olla estaba a una temperatura mayor a la de cocción, el P18S no alcanzaba una temperatura estable superior o igual a 90 °C, por lo que la resistencia continuaba activándose aún y cuando no era necesario.

Por todas, fueron 13 veces en las que el sistema de respaldo aportó energía al cocedor solar, 3 antes de que la temperatura del interior de la olla fuera igual o superior a la de cocción, y 10 luego que ya la había superado.

En total fueron 54 minutos en los que la resistencia eléctrica estuvo activada.

Se observó vapor de agua que logró salir de la olla de presión, esto hace evidente que la energía suministrada por el sistema de respaldo fue más de la necesaria.

Con estas pruebas el sistema de respaldo eléctrico ha demostrado ser eficaz, ha logrado mantener la temperatura de los alimentos por encima de la de cocción y por cualquiera que sea el tiempo requerido, la opción de programar estos valores lo hace posible, además de que aumenta la diversidad de alimentos que se pueden preparar con el cocedor solar.

De cualquier manera hay mejoras que se le pueden hacer para hacerlo eficiente, a continuación se presentan algunas identificadas con estas evaluaciones experimentales.

Se recomienda que sean tres, y no una, las temperaturas que use el sistema de control para hacer la comparación con que finalmente decide si aportar o no energía al sistema. Una como temperatura mínima que debe tener cuando se termine el tiempo de calentamiento con energía solar, otra para que sea el límite superior e indique cuando debe apagarse la resistencia eléctrica y una para que sea

la temperatura mínima que puede haber, luego de haber pasado el tiempo de calentamiento con energía solar. A continuación se argumenta esta idea de manera más detallada.

La temperatura de la región en la que se coloque el sensor del sistema de control difícilmente llegará a los 90 °C al mismo tiempo que los alimentos, esto se podría solucionar estableciendo una temperatura mínima para cuando concluya el calentamiento solo con energías solar. Con las pruebas hechas se aconseja una comprendida entre 80 °C y 85 °C, o visto de otra manera 5 °C o 10 °C por debajo de la temperatura de cocción. Esta última manera de presentar la mejora propuesta es pensando en que siga siendo solo una la temperatura que tenga que programar el usuario.

Cuando la resistencia eléctrica se activa, la temperatura de la región bajo la superficie metálica aumenta más rápido que la del interior de la olla, haciendo que el sistema de respaldo deje de aportar energía antes de que los alimentos alcancen la temperatura de cocción. Esto se podría evitar estableciendo una temperatura superior a la cual debe apagarse, así se mantendría activado durante más tiempo. Observando las evaluaciones experimentales se aconseja un valor entre de 110 °C y 115 °C para esta temperatura, o visto de otra forma a 20 °C o 15 °C por encima de la temperatura de cocción.

Luego que los alimentos alcanzan la temperatura de cocción, si se mantiene estable a esa temperatura, la región bajo la base metálica también se mantiene estable pero a una temperatura menor, así que aunque esté por debajo de la de cocción no es necesario encender de nuevo la resistencia eléctrica.

Por otro lado, si la radiación solar disminuye a tal grado que cause que los alimentos se enfríen por debajo de los 90 °C, la temperatura de la región en la que se coloca el sensor del control disminuirá a una menor y a mayor velocidad que la de los alimentos. Por estas razones se propone establecer una temperatura mínima a la cual se deba encender la resistencia eléctrica. Con base a lo observado en la etapa experimental se propone un valor de entre 55 °C o 60 °C, o lo que es igual 45 °C o 40 °C menor a la temperatura de cocción.

Para mejorar el sistema de respaldo se recomienda incluir el tiempo que tarda la resistencia en llegar a su potencia nominal, así como la energía que acumula por alcanzar temperaturas tan altas.

El sensor de temperaturas usado ha causado muchos problemas, se recomienda remplazarlo con un termopar.

Hasta ahora el sistema de respaldo eléctrico es on/off, y no regula la potencia con que se agrega energía al sistema, si esta pudiera controlarse se lograrían generar curvas de cocción para los diferentes alimentos, apoyándose en los números característicos obtenidos en la caracterización del cocedor.

Con el análisis y discusión hecha por los resultados obtenidos se llega a las conclusiones del trabajo realizado, estas se presentan en el siguiente capítulo.





## 6. Conclusiones

Hoy como hace miles de años, cocinar alimento es la necesidad más importante para el ser humano, en la actualidad, y a pesar de todas las tecnologías existentes, se siguen presentando problemas alrededor de esta actividad, problemas que van desde riesgos para la salud y el ambiente, hasta el desabasto por crisis económica y energética.

El uso de energía solar para la cocción de alimento representa una solución viable para esta problemática, aunque por otro lado también tiene sus propios inconvenientes. Los principales son: la intermitencia de la radiación solar, la complejidad de operación de las cocinas solares, que requiere intervención humana continua, los tiempos de comida no concuerdan con los de cocción e incluso puede ser costoso.

En este trabajo se presentó la evaluación teórica y experimental de una nueva propuesta de cocedor solar que busca atacar estos inconvenientes. Es un dispositivo que cuenta con un sistema de respaldo eléctrico que ofrece la posibilidad de programar tiempos y temperaturas de cocción, tiene un sistema de concentración muy sencillo y fácil de ajustar. Además, su construcción, mantenimiento y operación son igualmente fáciles.

Así pues, de este trabajo se puede concluir que el objetivo principal, que fue evaluar teórica y experimentalmente un cocedor solar doméstico, se cumplió satisfactoriamente.

Se desarrolló un modelo termodinámico que predice la evolución de la temperatura de los alimentos a lo largo de la operación del cocedor solar. Esto lo hace a partir de las propiedades termofísicas de sus materiales, las dimensiones de sus componentes, su geoposición, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación solar global y la directa.

Se pudo observar que el modelo haría una mejor predicción si se considerara de manera más detallada el transporte de energía desde y hacia el cocedor solar, así como contemplando otras variables como la velocidad del viento.

Además se estableció el método para el cálculo de la potencia máxima de cocción, la temperatura máxima del cocedor, el coeficiente de enfriamiento y la medida única de desempeño del cocedor solar basándose en los procedimientos que se usan para otros cocedores.

El modelo termodinámico propuesto también se puede usar para predecir cómo se comportará el cocedor si se cambia de localidad o si se hacen modificaciones en su diseño.

En este trabajo también se hizo la determinación de la transmitancia del plástico usado para construir la cúpula y la reflectancia de los espejos del concentrador solar. La capacidad de soportar altas temperaturas y lo fácil de conseguir del plástico, así como lo común y accesible del espejo, son características que los hacen buenas opciones para el diseño y construcción de tecnologías solares. La transmitancia del plástico se determinó con un radiómetro, tuvo un valor de 0.6978. Por otro lado, la reflectancia del espejo se obtuvo con un espectrofotómetro y se estimó de  $0.844 \pm 0.002$ .

Las propiedades de los materiales impactan de manera sustancial la predicción hecha por el modelo termodinámico, por lo que se recomienda proseguir con la caracterización de los mismos.

Se construyeron dos cocedores con los que se hicieron corridas experimentales, con estas se obtuvieron datos para evaluación del cocedor. Los materiales usados respondieron de manera excelente a las condiciones bajo las que opera el aparato.

La etapa experimental generó una bitácora, en la que se explica como hacer las pruebas, a la vez que se generó una base de datos con la que se pueden hacer ejercicios y comparar las predicciones hechas por otros modelos teóricos.

La principal mejora que se identificó para la etapa experimental contempla incrementar la sensibilidad del sistema de adquisición de datos, así como implementar termopares en lugar de los sensores usados en este trabajo.

Se probó el sistema de respaldo eléctrico y se demostró la capacidad que tiene para programar y hacer cumplir temperaturas y tiempos de cocción.

A pesar de que el sistema de control demostró ser eficaz, queda hacerlo eficiente. Para esto se recomienda modificar el algoritmo con que opera y contemplar variables relacionadas con la potencia de cocción del cocedor. Tal vez el siguiente paso sea preprogramar métodos de cocción.

En cuanto al diseño, aún quedan posibilidades por explorar, el hecho de no haber usado hasta ahora ningún aislante representa un pendiente que promete mejorar el diseño y que requiere de más investigación. Por otra parte, el sistema de concentración solar propuesto, aunque sencillo, incrementa de manera importante la potencia de cocción del dispositivo. Ahora bien, comparado con otros cocedores, el concentrador de este es muy pequeño, fácilmente se podría incrementar al doble su tamaño sin salirse de lo común para esta tecnologías.

Una vez hechas las pruebas necesarias se obtuvo que el modelo presenta una discrepancia máxima con respecto a los datos experimentales de 8.3 % y una promedio de 4.36 % cuando no usa el sistema de concentración solar, mientras que cuando si se usa la diferencia máxima es de 9.30 % y la promedio de 6.08 %.

El efecto de la presencia de la base metálica y el sistema de concentración se analizó como sigue: cuando el cocedor cuenta con ambos su potencia de cocción máxima es de  $103 \pm 5$  W, su temperatura máxima  $115.4 \pm 0.1$  °C, su potencia de cocción para una diferencia de temperatura entre el cocedor y el ambiente de 50 °C es de  $43 \pm 7$  W y su coeficiente de enfriamiento  $1.3 \pm 0.2$  W/K. Para el caso en el que el cocedor se usa como una estufa solar abierta, es decir, con sistema de concentración y sin la base metálica estos valores son de  $73 \pm 4$  W,  $90.4 \pm 0.2$  °C,  $10 \pm 10$  W y  $1.1 \pm 0.2$  W/K, respectivamente.

Con estos resultados se puede concluir que la base metálica si mejora el desempeño del cocedor solar al aumentar su área de captación.

Por otro lado cuando al cocedor solar se le retira el sistema de concentración los valores obtenidos son de  $80 \pm 4$  W,  $89.7 \pm 0.2$  °C y  $20 \pm 10$  W, respectivamente.

En este último análisis se puede observar que la presencia del sistema de concentración solar, al igual que la base metálica, mejora el desempeño del cocedor solar.

Con este trabajo se ha logrado evaluar una nueva tecnología para la cocción de alimentos y se ha demostrado como la innovación de aumentar el área de captación si representa una mejora para el funcionamiento del cocedor. Con esto, se puede alentar a seguir con el trabajo necesario para llevar este dispositivo hasta sus últimas etapas de diseño, confiando en este estudio previo que demuestra su viabilidad.



# Referencias

- [1] Del Río, J. A., Tapia Salinas Saúl, Oscar. A. Jaramillo, “Cocedores Solares”, Revista Digital Universitaria, Vol. 11, No. 10, ISSN: 1607-6079, 2010.
- [2] Suarez, Raspopov Roberto, “Análisis Termodinámico de un Cocedor Solar Doméstico”, Tesis licenciatura en física, México D. F. Mex., Facultad de Ciencias de la, UNAM, 61 p. 2011.
- [3] Bergman, Theodore, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, “Introduction to Heat Transfer”, 6<sup>a</sup> edición, ed. John Wiley & Sons, Inc., EUA, 2007, 960 p.
- [4] Nava, Ayala Calaudia, “Control automático del proceso de cocción en un cocedor solar”, Morelos, México, Instituto Tecnológico de Zacatepec, 2013, 63 pp.
- [5] Tapia, S. Saúl, “Cocedor Solar con Respaldo Eléctrico”, Tesis M. I., Morelos., México, Centro de Investigación en Energía, UNAM. 130 p. 2006.
- [6] A. Funk Paul, “Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance”, Solar energy, Vol. 68, No. 1, E.U.A., 1999, 7 p.
- [7] Castrejón García, R., Morales A., “Development of an Improved Newtonian Total Radiometer, Its Evaluation and Calibration”, Revista Mexicana de Física 44, 1998.
- [8] CUCE, E., Cuce PM., “A Comprehensive Review on Solar Cookers”, Applied Energy, Elsevier, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.002>.
- [9] Duffie J.A., Beckman W.A. “Solar Engineering of Thermal Processes”, John Wiley & Son Inc., New York, E.U.A., 1991, 919 p.
- [10] Kalogirou S. A., “Solar Energy Engineering Process and Systems”, Elsevier Inc., London, UK, 760 p.
- [11] Sosa M. F., “Hacia una Cafetera Solar. UNAM”, Tesis M. I., Morelos., México, Centro de Investigación en Energía, UNAM, 2007, 67 p.
- [12] Panwar, N. L., Kaushik S. C., Surendra Kothari, “State of the art of solar cooking: An overview”, Renewable and sustainable energy reviews 16, Elsevier, 2012, 23 p.

[13] Muthusivagami, R. M., Velraj R., R. Sethumadhavan, "Solar cookers with and without thermal storage-A review", *Renewable and sustainable energy reviews* 14, Elsevier, 2012, 10 p.

[14] Masera, Omar, Díaz Rodolfo, Víctor Berrueta, "Programa para el uso sustentable de la leña en México: de la construcción de estufas a la apropiación de tecnología", UNAM, Michoacán, México, 7 p.